

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



К.П.МЫНКИН

•
**сепарационные
устройства
паровых
котлов**



К. П. МЫНКИН

СССР

УФ

СЕПАРАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ПАРОВЫХ КОТЛОВ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1971

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Обзор применяемых сепарационных устройств	5
1-1. Назначение сепарационных устройств	5
1-2. Типы сепараторов	6
1-3. Схемы включения и месторасположение сепараторов	10
1-4. Развитие сепарационных устройств	13
Глава вторая. Показатели качества пара и методы их определения	22
2-1. Условная схема внутрикотловых процессов	22
2-2. Источники загрязнения пара	24
2-3. Классификация котлов по влажности вырабатываемого пара	27
2-4. Отбор проб и показатели качества пара	29
2-5. Методы определения качества пара	36
Глава третья. Объемные сепараторы	40
3-1. Особенности работы	40
3-2. Включение паровых объемов	42
3-3. Расчет нагрузки паровых объемов	44
3-4. Расчет пароперепускных и водоперепускных сечений	50
3-5. Конструктивное оформление объемных сепараторов	53
3-6. Устройства, способствующие максимальному использованию парового объема	56
Глава четвертая. Пленочные сепараторы	57
4-1. Устройство пленочных сепараторов	57
4-2. Центробежные ускорения в жалюзийных сепараторах	59
4-3. Влияние жалюзи на работу объемных сепараторов	62
4-4. Расчет жалюзийных сепараторов	65
Глава пятая. Массообменные сепараторы	68
5-1. Устройство массообменных сепараторов	68
5-2. Объемные массообменные сепараторы	70
5-3. Струйные массообменные сепараторы	71
5-4. Барботажные массообменные сепараторы	73
Глава шестая. Центробежные сепараторы	75
6-1. Радиальные циклоны	75
6-2. Радиально-осевые циклоны	78

6-3. Работа циклонов при котловой воде высокого соле- содержания	85
6-4. Центробежные паропромывочные устройства	87
6-5. Гидравлический расчет элементов циклонов	90
Глава седьмая. Сравнительная эффективность сепара- торов	99
7-1. Предельное солесодержание котловой воды	99
7-2. Нагрузка паровых объемов и качество котловой воды	104
7-3. Влияние конструктивных особенностей котлов на выбор сепарационных устройств	105
7-4. Гидравлическое сопротивление сепараторов	108
7-5. Условия циркуляции в контурах и сопротивление сепараторов	112
7-6. Конструктивные особенности сепараторов	116
7-7. Область применения сепараторов различных типов	123
Глава восьмая. Классификация сепарационных устройств	127
8-1. Задачи классификации	127
8-2. Схемы включения	129
8-3. Структурные схемы сепарационных устройств	137
8-4. Составление структурных схем	139
Глава девятая. Теплохимические испытания котлов	140
9-1. Задачи и этапы проведения теплохимических испы- таний	140
9-2. Виды теплохимических испытаний котлов	141
9-3. Пуско-наладочные и режимные испытания	143
9-4. Контроль качества пара и воды	147
9-5. Прикидочные и основные опыты	151
9-6. Обработка материалов испытаний	153
Глава десятая. Изготовление, монтаж и ремонт сепара- ционных устройств	157
10-1. Изготовление и монтаж внутрибарабанных устройств	157
10-2. Изготовление и монтаж выносных циклонов	160
10-3. Ремонт сепарационных устройств	161
10-4. Техника безопасности при работе в барабанах	163
Глава одиннадцатая. Наладка и эксплуатация сепара- ционных устройств	164
11-1. Эксплуатация сепарационных устройств	164
11-2. Пульсация уровней воды в барабанах	166
11-3. Стабилизация положения уровней воды по отсекам	169
11-4. Стабилизация непрерывной продувки	171
11-5. Выравнивание солесодержания воды в параллель- но включенных циклонах	175
11-6. Модернизация сепарационных устройств	177
Литература	188

Мынкин К. П.

М 94 Сепарационные устройства паровых котлов. М., «Энергия», 1971.

192 с., с илл.

В книге изложены основные условия надежной и экономичной работы сепарационных устройств промышленных паровых котлов. Большое внимание уделено устройствам и способам разрушения пены, центробежным сепараторам-циклонам, внутрибарабанным циклонам.

Изложена методика выбора и расчета основных элементов сепарационных устройств. Предложена классификация схем совместного включения различных сепараторов. Рассмотрены качество исходной воды, интенсификация процессов сепарации, эффективность работы отдельных типов сепараторов.

Книга рассчитана на эксплуатационный персонал промышленных котельных и может быть использована в качестве вспомогательного материала при наладке и разработке мероприятий для повышения эффективности и надежности работы паровых котлов.

3-3-3
39-70

6П2.22

Мынкин Кузьма Павлович

СЕПАРАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Редактор С. М. Шухер

Редактор издательства А. А. Кузнецов

Технический редактор М. П. Осипова

Обложка художника Е. В. Никитина

Корректор А. Д. Халанская

Сдано в набор 11/1 1971 г. Подписано к печати 1/VI 1971 г. Т-09719

Формат 84×108¹/₃₂

Усл. печ. л. 10,08

Тираж 12 000 экз.

Бумага типографская № 1

Уч.-изд. л. 11,24

Зак. 17

Цена 60 коп.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Паровые котлы низкого и среднего давления составляют значительную долю в общем числе котлов, используемых в энергетике страны. Промышленные котлы низкого давления расходуют 46% топлива, потребляемого в энергетике страны [Л. 1]. Котлы среднего давления применяют как в промышленных котельных, так и на промышленных ТЭЦ. Количество ежегодно вводимых в эксплуатацию котлов небольшой паропроизводительности весьма велико и они еще долгое время будут являться основными источниками теплоснабжения предприятий [Л. 2].

Несмотря на то что к конструкциям малых котлов предъявляют вполне определенные требования в отношении надежности, экономичности и удобства эксплуатации [Л. 3], замечается ощутимое отставание уровня развития котельной техники промышленных и энергетических котлов среднего давления по сравнению с энергетическими котлами большой производительности.

Основное количество котлов среднего и низкого давления питается смесью возвращаемого с производства конденсата и добавки химически очищенной воды, что экономически целесообразно, поскольку исключает применение паропреобразователей и испарителей. Плотный остаток питательной и котловой воды сравнительно высок [Л. 4] из-за больших потерь конденсата (табл. П-1).

Кроме общего содержания питательной воды на надежность и экономичность работы котлов оказывает

Таблица П-1

Характер производства	Возврат конденсата, %	
	фактический	возможный
Транспорт и тяжелое машиностроение	40	80
Автотракторное и сельскохозяйственное машиностроение	30	70
Химическая промышленность	20	60
Нефтеперерабатывающая промышленность	26	50
Текстильная промышленность	20	65

большое влияние температура питательной воды и содержание кислорода в ней [Л. 5, 6]. По данным Госгортехнадзора РСФСР из-за неудовлетворительного водного режима и внутрикотловых процессов происходит около 40% аварий [Л. 7].

Последние годы развития сепарационных устройств характеризуются быстрым повсеместным применением выносных и внутрибарабанных циклонов на больших энергетических котлах. На промышленных котлах выносные циклоны применяют достаточно успешно. Приведенные в настоящей книге материалы показывают целесообразность расширения области применения также и внутрибарабанных циклонов для небольших котлов.

С этой целью приведены рекомендации для снижения гидравлического сопротивления циклонов. Рассмотрены вопросы выбора оптимальных схем и конструкций, а также расчета элементов сепарационных устройств.

Для облегчения поиска оптимальных решений изложена разработанная автором классификация схем включений сепарационных устройств, а также приведена систематизация различных модификаций отдельных элементов сепараторов.

Книга составлена на основе многолетнего опыта автора по наладке сепарационных устройств котлов. Использованы также материалы ЦКТИ, ОРГРЭС, Союзхимпромэнерго, Центроэнергомонтаж, Центроэнергоцветмет и других организаций, занимающихся наладкой, проектированием и эксплуатацией котлов среднего и низкого давления, а также отечественные и зарубежные патентные материалы и статьи, опубликованные в технических журналах.

Автор выражает признательность проф. Т. Х. Маргуловой, докт. техн. наук Е. Ф. Бузникову, проф. К. Ф. Роддатису, инженерам Ю. А. Соколову, В. В. Шлаповой за ряд ценных замечаний и рекомендаций, способствовавших улучшению рукописи. Особую благодарность автор выражает канд. техн. наук Ф. И. Белану и инж. С. М. Шухеру, давшим ценные советы при создании книги.

Критические замечания по данной книге просьба направлять в изд-во «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10. Автор заранее приносит благодарность за все указания и замечания по содержанию книги.

Глава первая

ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Элементы паровых котлов, в которых осуществляется отделение пара от воды, называются сепарационными устройствами. Сепарационные устройства служат также для вывода из водяного объема пузырьков пара, которые могут увлекаться в опускные трубы, что нежелательно, поскольку с уменьшением плотности пароводяной смеси в опускных трубах снижается движущий напор циркуляционных контуров.

Для характеристики сепарационных устройств служат следующие основные показатели.

Степень совершенства процесса разделения пара и воды, т. е. его к. п. д., который является основным показателем всякого сепарационного процесса. В зависимости от типа котельного агрегата эффективность процесса сепарации оценивается либо влажностью пара W , либо его солесодержанием S .

Например, паровые турбины требуют пар более высокого качества, чем теплообменные аппараты. Уровень температуры газов, омывающих пароперегреватель, обуславливает предельно допускаемую величину солесодержания насыщенного пара.

Гидравлическое сопротивление. Для осуществления процесса разделения пара и воды требуется затрата энергии. Перепад давления на входе и выходе сепараторов является важным показателем, влияющим как на собственно процесс сепарации (изменение параметров пара), так и на другие внутрикотловые процессы — циркуляцию и отложение накипи в трубах (с уменьшением кратности циркуляции интенсифицируется отложение накипи).

Особенно жесткие требования предъявляют к уменьшению сопротивления сепарационных устройств в случае питания их энергией циркуляционных контуров.

Нагрузка активного парового объема сепараторов — степень интенсификации процесса, с повышением которой увеличивается производительность сепараторов, либо уменьшаются их габариты.

Итак, назначением сепарационных устройств является разделение пара и воды с требуемой для данных конкретных условий степенью совершенства при сохранении эксплуатационной надежности агрегата.

1-2. ТИПЫ СЕПАРАТОРОВ

По принципу действия различают следующие типы сепараторов: объемные, пленочные, массообменные и центробежные.

Объемные сепараторы (рис 1-1, а). Объемным сепаратором называют паровой объем, в котором движется на-

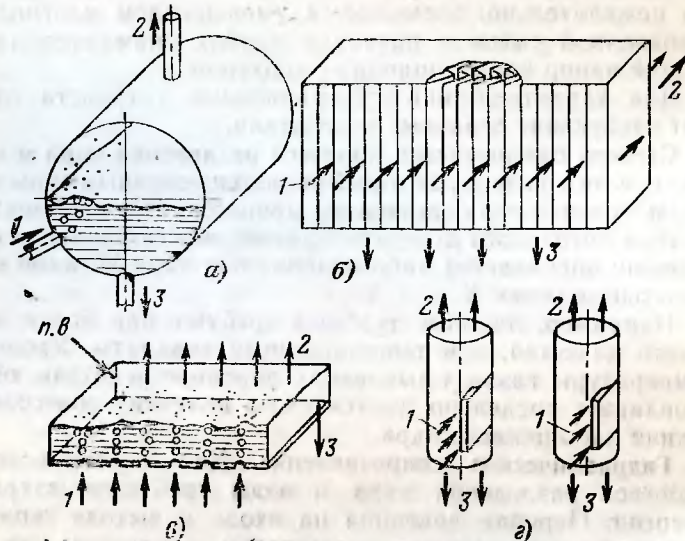


Рис. 1-1. Типы сепараторов.

а — объемные; б — пленочные (жалюзийные); в — массообменные (паропровочные); г — центробежные; 1 — ввод смеси; 2 — отвод пара; 3 — отвод воды; п.в — ввод питательной воды.

сыщенный пар либо пароводяная смесь. В барабанных паровых котлах основным элементом парового объема является верхняя часть барабанов, не заполненная водой. К нижней, заполненной водой части объемных сепараторов присоединяют опускные трубы. Отбор отсепарированного пара обычно осуществляется из верхней части барабанов.

В устройствах этого типа капли воды выпадают из потока пара под действием силы тяжести. Чем меньше скорость пара в объеме, тем выше качество получаемого пара. Объемные сепараторы особенно эффективны при котловой воде с солесодержанием не выше 500—700 мг/кг. В такой воде при среднем давлении не образуется устойчивой пены.

Для объемных сепараторов промышленных котлов при непрерывной продувке $p=10\%$ D_k допускается солесодержание питательной воды 50—70 мг/кг. При более высоком солесодержании питательной воды эти сепараторы можно применять лишь в качестве чистых отсеков схем ступенчатого испарения.

Объемные сепараторы различают с восходящим (см. рис. 8-7), горизонтальным, нисходящим и смешанным потоками пара. Сепараторы с нисходящим и горизонтальным потоками пара обладают невысокой эффективностью и их применяют сравнительно редко.

Принцип действия объемного сепаратора с восходящим потоком пара заключается в следующем. Капли котловой воды, образующиеся в результате разрушения паровых пузырьков, испытывают действие силы трения, увлекающей их с потоком, и силы тяжести, выводящей их из потока. Если сила тяжести превышает силу трения — капелька выводится из потока пара, чем и достигается разделение пара и воды. Мелкие капли котловой воды уносятся с потоком, создавая определенное солесодержание пара.

Пленочные сепараторы (рис. 1-1, б) состоят в большинстве случаев из набора тонкостенных пластинок сложного профиля, через зазоры которых проходит сепарируемый пар. Такие устройства называют жалюзийными сепараторами. К пленочным сепараторам можно также отнести широко применяемые перфорированные потолки, поскольку они выравнивают скорость пара по объему барабана так же, как и жалюзи.

Пленочные сепараторы имеют сильно развитые поверхности соприкосновения очищаемого пара со стенками сепаратора, что достигается применением пакетов гофрированных листов.

Мелкие капельки котловой воды, имеющиеся в паре, при соприкосновении со стенками сепаратора оседают на них и в виде пленки стекают в водяной объем барабана. Движение пара в криволинейных каналах вызывает центробежные ускорения, способствующие выпадению капелек влаги на поверхность сепараторов.

Пленочные сепараторы способствуют равномерному распределению потоков пара в паровом объеме и гасят кинетическую энергию струй пароводяной смеси. Предельное солесодержание котловой воды для этих сепараторов составляет 900—1 000 мг/кг.

Массообменные (паропромывочные) сепараторы (рис. 1-1,б). В этих устройствах сепарируемый пар соприкасается с относительно чистой (обычно питательной, реже — специально приготовленной) водой. В результате происходящего массообмена из пара вымывается часть примесей, переходящих в промывочную воду. Освобождаясь от частиц котловой воды, пар одновременно обогащается частицами более чистой промывочной воды, в результате чего снижается его солесодержание даже в случае некоторого повышения влажности.

Массообменные устройства способны улавливать растворенные в паре вещества, в то время как все другие типы сепараторов обладают этими свойствами в минимальной степени. В этом — уникальное свойство массообменных сепараторов, особенно важное для котлов высокого давления.

В наиболее эффективных устройствах суммарный коэффициент очистки пара достигает 0,9, т. е. солесодержание пара уменьшается в 10 раз [Л. 4]. Данные устройства применимы при солесодержании котловой воды 1 500—2 000 мг/кг. Обязательным условием надежной работы массообменных сепараторов является использование сравнительно чистой промывочной воды.

Центробежные сепараторы (рис. 1-1,г). В этих сепараторах создается вращательное движение сепарируемого пара и под действием центробежного, кориолисова и земного ускорений частицы влаги интенсивно выделяются из потока пара. Центробежные сепараторы подразделяются на вращающиеся и неподвижные.

Вращающиеся сепараторы — центрифуги имеют роторы, увлекающие своим движением поток сепарируемого пара [Л. 8]. Преимущества этих сепараторов — высокая эффективность и малые габариты; од-

нако из-за недостаточной эксплуатационной надежности такие устройства в энергетике СССР не получили распространения.

Неподвижные сепараторы — циклоны обеспечивают вращение пара в корпусах благодаря наличию устройства ввода пароводяной смеси. Эффективная работа циклонов достигается при высокой скорости ввода пароводяной смеси и достаточно высоком центробежном ускорении.

Циклон представляет собой цилиндр, в котором вращение пароводяной смеси организовано с целью разделения воды и пара. В закрученном потоке весьма интенсивно происходят разделение сред различной плотности и массообмен.

Траектория движения потоков пара, зависящая от взаимного расположения штуцеров ввода пароводяной смеси и отбора пара определяет тип циклонов. До настоящего времени отсутствует единая общепринятая терминология, охватывающая все основные модификации типов и конструкций, а также схем включения циклонов. С целью устранения этого недостатка в данной работе сделана попытка унифицировать терминологию. За основу приняты уже утвердившиеся термины, а также позаимствованные из смежных областей техники, например, для центрифуг, насосов и турбин.

Циклоны различают следующих типов: осевые (см. рис. 8-8, О), радиальные (см. рис. 8-8, Р) и радиально-осевые (см. рис. 8-8, Р—О).

Циклоны осевого типа здесь не рассматриваются, поскольку в отечественной энергетике они распространения не получили. Циклоны радиального типа, а также радиально-осевого типа будут подробно рассмотрены в гл. 8. На рис. 8-8,а показана схема циклона с замкнутой, а на рис. 8-8,б — с незамкнутой траекториями движения пара. Циклоны с незамкнутой траекторией заметного распространения не получили.

Предельное солесодержание котловой воды для удачно выполненных циклонов составляет 2 000—200 000 мг/кг. Благодаря высокой их эффективности при высоком солесодержании котловой воды циклоны получили широкое распространение в энергетике. Из приведенных данных видно, что для различных условий водно-химического режима работы котлов следует применять сепараторы, наиболее полно отвечающие поставленным задачам.

1-3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ И МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЕ СЕПАРАТОРОВ

Схемы включения. Применяют параллельную, последовательную и смешанную схемы включения сепараторов.

Параллельное включение (рис. 1-2,а) осуществляют в тех случаях, когда пропускная способность од-

ного сепаратора недостаточна для пропуска всего пара. В отдельных случаях параллельно включают от нескольких десятков до нескольких сотен сепараторов (батареи циклоны, жалюзи).

Последовательное включение (рис. 1-2,б) применяют для улучшения процессов сепарации, если в одном сепараторе не достигается требуемая эффективность отделения пара от воды. Применяют схемы с двумя, тремя и более последо-

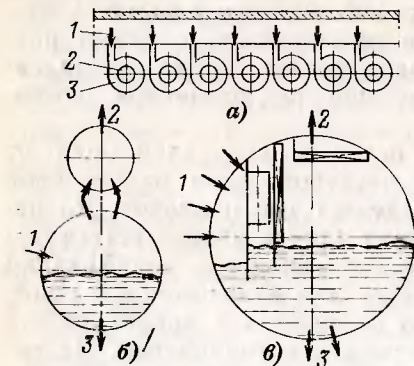


Рис. 1-2. Схемы включения сепараторов.

а — параллельная; б — последовательная; в — смешанная; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — сбор пара; 3 — отвод воды.

вательно включенными сепараторами. При этом часто включают сепараторы различных типов.

Смешанная схема включения сепарационных устройств предусматривает как параллельное, так и последовательное включение отдельных сепараторов (например, как на рис. 1-2,в). На практике чаще всего встречаются именно смешанные схемы, обладающие наибольшими возможностями для обеспечения требуемого эффекта сепарации.

Место расположения сепараторов. При размещении сепараторов внутри барабана их называют **внутрибарабанными**, а при расположении вне барабана — **выносными**.

Внутрибарабанные сепараторы можно изготовлять из тонкостенного металла, поскольку они не испытывают полного рабочего давления. Такие сепараторы вы-

полняют всех четырех типов: объемные, пленочные, массообменные и центробежные.

Выносные сепараторы, корпуса которых рассчитывают на полное рабочее давление пара, также могут быть всех четырех типов, однако для паровых котлов получили широкое распространение лишь объемные и центробежные.

К объемным выносным сепараторам прежде всего можно отнести сухопарники (рис. 1-2,б), широко применяемые в котлах старых типов. Основное назначение этих устройств — отделение больших масс воды при резком ухудшении качества пара. В современных котлах сухопарники обычно не устанавливают.

Для грубого разделения пара и воды применялись также предвключенные барабаны.

Большое распространение получили выносные центробежные сепараторы — выносные циклоны — особенно широко распространенные в энергетике СССР [Л. 9]. Выносными циклонами оборудовано большое количество котлов. Обычно выносные циклоны применяют в схемах ступенчатого испарения в качестве II и III ступеней испарения. Встречаются также схемы включения выносных циклонов в качестве линейных сепараторов.

Выносные сепараторы по сравнению с внутрибарабанными обладают более высокой сепарирующей способностью, что может быть объяснено большей высотой сепарационного объема, не ограниченного диаметром барабана.

Применение различных схем включения отдельных сепараторов существенно изменяет условия движения пароводяной смеси в циркуляционных контурах, что необходимо учитывать при выборе сепарационных устройств.

Различают также сепараторы входные, промежуточные, выходные и единые.

Всякий сепаратор можно включить на входе пароводяной смеси в барабан. Такие сепараторы называются **входными** (см. рис. 6-8,а, б). Через входные сепараторы проходит вся пароводяная смесь и они питаются энергией циркуляционных контуров.

Если перед сепаратором и после него имеются другие сепараторы, то такие сепарационные устройства называются **промежуточными** (см. рис. 6-8,в). Например, наличие перед пленочными сепараторами разомк-

нутого снизу объема (см. рис. 4-2,б) для предварительного грубого разделения воды и пара существенно улучшает процесс сепарации. Основная масса циркулирующей в контурах воды не проходит через сечения промежуточных сепараторов, в результате чего уменьшается их гидравлическое сопротивление и повышается эффективность разделения.

Паровой объем на выходе из промежуточных сепараторов (например, жалюзи) является тонким сепаратором, в который поступает предварительно очищенный пар со скоростью, выравненной в жалюзи.

Промежуточными могут быть сепараторы всех типов: объемные, пленочные, массообменные и центробежные. Массообменные сепараторы распространены в основном в виде промежуточных устройств.

Промежуточные циклоны размещают после какого-либо сепаратора (в том числе и центробежного). В промежуточные циклоны пароводяная смесь поступает частично отсепарированной. За промежуточными циклонами предполагается также наличие тех или иных сепараторов (см. рис. 6-8,в). Источником питания энергией промежуточных циклонов также служит циркуляционный контур. Характерной особенностью промежуточных циклонов является их пониженное гидравлическое сопротивление из-за уменьшения плотности поступающей в них пароводяной смеси. При этом практически представляется возможным снизить сопротивление для контуров циркуляции с 3000—10 000 до 50—100 кгс/м².

Выходными (см. рис. 6-8,е, з) называют сепараторы, которые включены на выходе пара из барабана. В этом случае паровой объем барабана вместе с остальными сепарационными устройствами используется в качестве предварительного сепаратора (см. рис. 4-2,в, г), а тонкая очистка пара от капелек воды завершается в выходном сепараторе.

В качестве выходных могут быть применены сепараторы всех типов. Выходные объемные сепараторы упоминались выше (сухопарники); выходные жалюзийные сепараторы, в которых тонкая очистка пара от воды завершается на пластинах жалюзи, получили широкое распространение как в СССР, так и за рубежом. Схема весьма эффективна при конденсатном режиме.

Конструктивное оформление выходных жалюзийных сепараторов, распространенных в СССР, показано на

рис. 4-2,г (котлы ДКВ—ДКВР). Выходные массообменные сепараторы известны лишь как центробежные аппараты, когда питательная вода подается в выходные циклоны (см. гл. 6).

Выходные циклоны служат для окончательной тонкой очистки пара. Перед ними имеется один или несколько предвключенных сепараторов (любых типов), за ними других сепарационных устройств нет.

Все выходные сепараторы питаются энергией избыточного давления пара в барабане, что особенно важно для центробежных сепараторов, имеющих большое гидравлическое сопротивление.

Едиными (см. рис. 6-14,а) называют такие сепараторы, в которых совершается весь цикл сепарации. Кроме объемных известны также единые центробежные сепараторы — выносные циклоны, которые могут работать параллельно с барабаном (см. рис. 6-8,д), а также в безбарабанных котлах с естественной циркуляцией (см. рис. 6-8,ж). Источником питания их энергией служит циркуляционный контур котла.

Комбинированием различных схем включения сепараторов разных типов можно получить большое число вариантов сепарационных устройств с весьма разнообразными рабочими характеристиками.

1-4. РАЗВИТИЕ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Развитие сепарационных схем и конструкций сепараторов в СССР учитывало комплексное использование тепловой и электрической энергии. В развитии сепарационных устройств барабанных паровых котлов можно отметить неуклонное повышение их эффективности.

Одни из первых сепарационных устройств — отбойные козырьки в барабане (рис. 1-3,а) — обладали сравнительно невысокой эффективностью и могли применяться лишь при малом солесодержании котловой и питательной воды, а также невысоких требованиях к качеству вырабатываемого пара.

Значительным шагом в развитии внутрибарабанных устройств явилось применение жалюзийных сепараторов (рис. 1-3,б). В этих сепараторах надежно гасится кинетическая энергия струй пароводяной смеси, поступающей в барабан из кипящих труб. Это обес-

печивает эффективную работу основного сепарационного объема. Еще большей эффективностью обладает схема с подводом всей пароводяной смеси под уровень воды (рис. 1-3,в). По этой схеме питательная вода подается на зеркало испарения в виде тонких струек из напорного коллектора, в результате чего осуществляется дополнительная промывка пара.

Характерной чертой в развитии и усовершенствовании сепарационных устройств в последние десятилетия

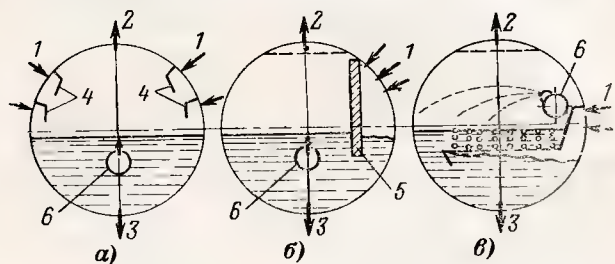


Рис. 1-3. Сепараторы, применяемые при малом соледержании котловой и питательной воды.

а — объемный; б — жалюзийный; в — массообменный; 1 — ввод смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды; 4 — отбойный козырек; 5 — жалюзийный сепаратор; 6 — коллектор питательной воды.

является быстрое распространение центробежных сепараторов — циклонов. В результате этого в настоящее время большинство крупных барабанных котлов оборудовано внутрибарабанными либо выносными циклонами. Много котлов оборудовано теми и другими циклонами одновременно.

Одной из первых удачных конструкций внутрибарабанных циклонов, широко примененной в отечественной энергетике, был циклон ОРГРЭС [Л. 10] (рис. 1-4,а). Применением этих циклонов в значительной степени обусловлено успешное распространение схем ступенчатого испарения, в то время как другие типы сепараторов в солевых отсеках оказывались мало эффективными. Усовершенствованная модель циклона ОРГРЭС (рис. 1-4,б) получила в свое время широкое распространение.

Дальнейшее конструктивное усовершенствование внутрибарабанных циклонов заключалось в модернизации водоотводящих устройств и установке лотков над циклонами.

Лотки направляют поток пара вниз, чем достигается дополнительная сепарация (рис. 1-4,в) [Л. 11].

Котлостроительные заводы применяют внутрибарабанные циклоны в комплексе с жалюзийными сепараторами разработки ЦКТИ (рис. 1-4,г). Этими устройствами оборудовано большое число энергетических барабанных котлов среднего давления, имеющих ступенчатое испарение.

Центробежное ускорение в применяемых внутрибарабанных циклонах в 10—100 раз больше земного ускорения, а высота сепарационно-активного объема не превышает 0,5 м. Вследствие этого эффективность работы их по сравнению с циклонами других модификаций (например, с выносными циклонами) невысока, в результате чего они получили название «циклоны грубой сепарации». Тем не менее при высоком соледержании котловой воды циклоны грубой сепарации работают значительно лучше объемных, жалюзийных и массообменных сепараторов.

Описанные циклоны при их применении для II и III ступеней испарения дают большую экономию топлива вследствие уменьшения продувки. Рассмотренные конструкции внутрибарабанных циклонов используются и в чистых отсеках.

Применение ступенчатого испарения с выносными и внутрибарабанными циклонами (рис. 1-5) является крупным достижением нашего котлостроения, позволившем в кратчайшие сроки осуществить перевод отечественной энергетики на высокое давление без применения дорогостоящих схем водоподготовки

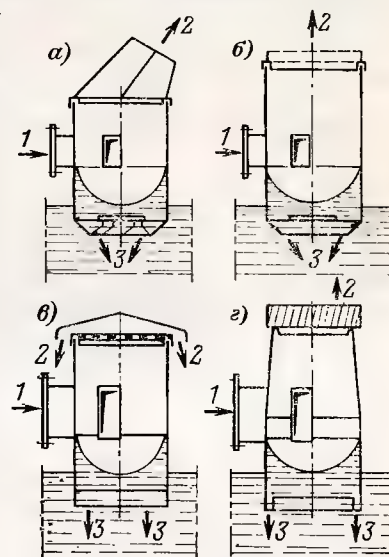


Рис. 1-4. Внутрибарабанные циклоны, применяемые в отечественной энергетике.

а — циклон с направляющим конусом; б — циклон с двойным перфорированным листом; в — циклон с перфорированным листом и лотком; г — циклон с жалюзием; 1 — ввод смеси; 2 — отвод пара; 3 — отвод воды.

с испарителями или химическим обессоливанием. В настоящее время все отечественные котлостроительные заводы приняли для серийных барабанных котлов большой мощности схемы ступенчатого испарения с выносными циклонами. Большое число таких котлов поставлено СССР и для зарубежных электростанций.

Кроме схем включения циклонов, показанных на рис. 1-1 и 1-5, применяют также другие схемы.

На рис. 6-8,з показана схема включения циклонов на выходе пара из барабана, применяемая на судовых кот-

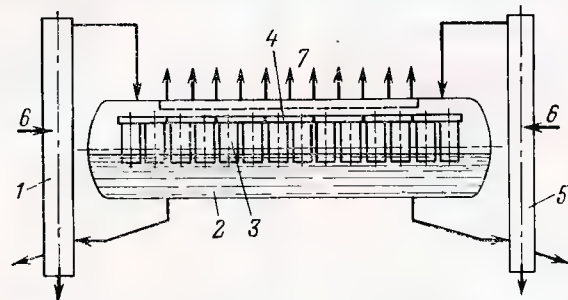


Рис. 1-5. Схема ступенчатого испарения с выносными и внутрибарабанными циклонами.

1 и 5 — выносные циклоны (вторая ступень испарения); 2 — барабан (первая ступень испарения); 3 — батарея внутрибарабанных циклонов; 4 — жалюзи; 6 — ввод смеси; 7 — отбор пара.

лах [Л. 12]. В развитие этой схемы автором для ряда промышленных котлов были разработаны центробежные сепараторы, включаемые также на выходе пара из барабанов. Такие сепараторы завершают процесс сепарации и в ряде случаев оказываются более эффективными по сравнению с другими сепарационными устройствами.

Кроме внутрибарабанных циклонов, включаемых на выходе пара из барабана, применяют также и выносные циклоны (рис. 6-8,е) [Л. 13]. Выносные циклоны и в данных схемах включения оказываются более эффективными по сравнению с внутрибарабанными. Включение циклонов на выходе пара из барабана практически не оказывает влияния на циркуляцию, что является важным преимуществом этих схем для малых котлов с небольшим движущим напором циркуляционных контуров.

Несколько иное направление имеют работы ЦКТИ по применению внутрибарабанных циклонов. Успешно

опробована схема сепарации всего пара в батарее внутрибарабанных циклонов при одноступенчатом испарении. Такая схема работает надежно при солесодержании котловой воды 5 000—7 000 мг/кг. К преимуществам такой схемы по сравнению со схемами ступенчатого испарения можно отнести упрощение поддержания оптимального водного режима котла. Трудности выполнения схемы циклонной сепарации обуславливались сравнительно большой сложностью конструктивного оформления батарей циклонов. К недостаткам схемы можно отнести существенное влияние гидравлического сопротивления циклонов на процессы циркуляции.

В промышленной энергетике ведутся поиски снижения гидравлического сопротивления циклонов для контуров циркуляции. В ЦКТИ разработаны выносные циклоны с распределенными объемными сепараторами. Гидравлическое сопротивление для контуров циркуляции у этих циклонов снижено до 300 кгс/м² [Л. 14]. Такие циклоны можно применять для котлов с малыми движущими напорами циркуляционных контуров.

В работе треста Центроэнерго-монтаж о выборе и методике расчетов отдельных узлов сепарационных устройств показано, что схема включения выносных циклонов влияет на положение уровня воды в циклонах [Л. 15]. На рис. 1-6 дана схема выносного циклона малого сопротивления. Эти циклоны ввиду приемлемых значений сопротивления входа смеси нашли широкое применение в котлах с малым движущим напором циркуляционных контуров. Применены трубы рециркуляции с сепараторами на входе и дроссельной шайбой на выходе, что уменьшает попадание пузырей пара в трубы рециркуляции.

Усовершенствование наиболее эффективных для котлов низкого и среднего давления сепараторов-циклонов

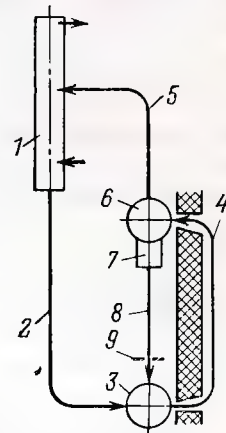


Рис. 1-6. Схема выносного циклона малого сопротивления.

1 — выносной циклон; 2 — опускная труба; 3 — нижний коллектор; 4 — кипящие трубы; 5 — пароотводящая труба; 6 — верхний коллектор; 7 — сепаратор рециркуляции; 8 — труба рециркуляции; 9 — дроссельная шайба.

проводилось в направлении улучшения гидравлических характеристик отдельных их узлов — уменьшение с 300—500 до 180—300 мм диаметров корпусов, улучшение конструкции ввода пароводяной смеси, коэффициент гидравлического сопротивления которого постепенно уменьшался с 4—5 до 1,2—1,5, что соответственно снизило сопротивление этих устройств. Усовершенствовались также устройства отбора пара и отвода воды из циклонов.

Особое место занимают паровые котлы-утилизаторы, использующие тепло уходящих газов топливопотребляющих агрегатов. Котлы-утилизаторы вырабатывают пар как для технологических целей, так и для турбин [Л. 16]. Вопросы качества пара для этих котлов остаются весьма актуальными, поскольку питательной водой для них служит обычно смесь умягченной воды с небольшой добавкой конденсата, возвращаемого с производства.

Котлы-утилизаторы требуют повышенной надежности сепараторов и улучшенных условий эксплуатации, поскольку выход котла-утилизатора из строя влечет за собой существенное ухудшение технологических процессов.

Процессы сепарации при среднем давлении представляют интерес также и для атомных электростанций. Отмечается, однако, что большое гидравлическое сопротивление наиболее эффективных сепараторов-циклонов ограничивает область их применения [Л. 17].

Приведенный обзор показывает, что для сепарации пара и воды находят все более широкое применение разнообразных циклонов. Ведутся интенсивные поиски путей дальнейшего распространения области применения циклонов, а также повышения эффективности их работы. Постепенно уменьшается гидравлическое сопротивление циклонов для контуров циркуляции, что повышает надежность эксплуатации котлов в целом. Для котлов промышленной энергетики эти вопросы особенно актуальны.

За рубежом развитие сепарационных устройств происходило несколько иным путем, чем в СССР. Для интенсификации процессов сепарации основное внимание уделялось снижению солесодержания питательной воды путем широкого развития схем полного обессоливания. Сравнительно малое развитие ТЭЦ за рубежом обуславливает малые потери конденсата, а при конденсатном режиме хорошо работают схемы с жалюзийными сепараторами (см. рис. 4-2, в) [Л. 18], которые получили весьма широкое распространение; некоторое количество кот-

лов с такими сепарационными устройствами поступило и в СССР.

Центробежные сепараторы получили распространение в зарубежной энергетике в основном в виде внутрибаранных циклонов, включаемых на входе пароводяной смеси. Для повышения эффективности работы сепараторов фирмы применяют циклоны с большим гидравлическим сопротивлением, работающие с высокой скоростью пара. Для обеспечения достаточной надежности работы циркуляционных контуров часто применяют циркуляционные насосы.

Ввиду широкого распространения схем полного обессоливания питательной воды схемы ступенчатого испарения получили за рубежом сравнительно малое распространение [Л. 19].

Следует отметить, что зарубежные конструкции схем ступенчатого испарения отличаются от отечественных. Для уменьшения отложений вторичной накипи в трубах солевых отсеков кипятильные трубы II ступени выводят в конвективную зону обогрева, где тепловые напряжения меньше, чем в топке. Для уменьшения выноса солей пар из солевых отсеков подвергают частичной или полной конденсации. В результате этих мероприятий повышается эксплуатационная надежность котлов.

Внутрибаранные циклоны фирмы Бабкок представляют собой входные циклоны. Над циклонами установлены жалюзи 4 (рис. 1-7, а). В котлах применяют батареи таких циклонов, через которые пропускается весь пар.

Циклоны фирмы Фостер-Уиллер (рис. 1-7, б) имеют двойные корпуса. На выходе пара из циклонов устанавливают жалюзи 4, в которых гасится кинетическая энергия пара. Эти циклоны обладают высокой эффективностью, но требуют применения циркуляционных насосов, поскольку гидравлическое сопротивление их значительно.

Фирма Фостер-Уиллер применяет также горизонтальные циклоны 5 с центральным отбором пара (рис. 1-7, в). Отвод воды из циклонов осуществляется с помощью дугообразным корытом 6, устанавливаемым у прорези в боковой стенке. Эти циклоны развивают центробежные ускорения, превосходящие земное, поэтому эффективность их работы практически не зависит от положения оси корпуса.

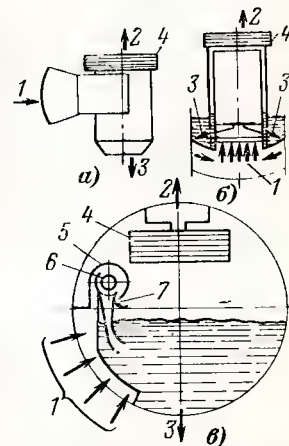


Рис. 1-7. Внутрибаранные циклоны, распространенные за рубежом. а — циклон Бабкок-Вилькокс; б — турбосепаратор Фостер-Уиллер; в — горизонтальный циклон Фостер-Уиллер; 1 — ввод смеси; 2 — отбор пара; 3, 7 — отвод воды; 4 — жалюзи; 5 — циклоны; 6 — отбор пара.

В настоящее время в зарубежной энергетике имеется тенденция к оборудованию всех паровых барабанных котлов центробежными сепараторами.

На зарубежных атомных парогенераторах, вырабатывающих насыщенный пар влажностью 0,25—1,0% при среднем давлении, для

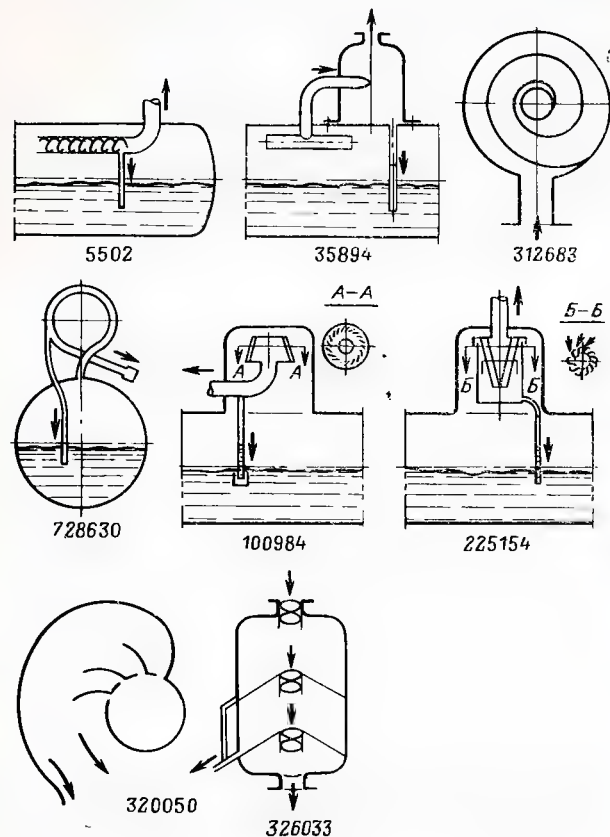


Рис. 1-8. Зарубежные патенты центробежных сепараторов.

уменьшения влажности пара по тракту применяют промежуточные сепараторы [Л. 17]. Отмечается, что поверхностные сепараторы при достаточно высокой сепарирующей способности (котловая вода имеет малое солесодержание) обладают большими габаритами, а центробежные сепараторы более компактны, но зато обладают повышенным сопротивлением и выдают пар влажностью 2,5%.

Примеры патентных схем центробежных сепараторов. В зарубежной патентной литературе имеется большое количество весьма

разнообразных по замыслу центробежных сепараторов, например патенты класса 13d, показанные на рис. 1-8.

В патенте 5502 описано устройство, в котором пар поступает в трубу с размещенным в ней шнеком. По-видимому, эффективность этого сепаратора высокая, но повышенный коэффициент сопротивления ограничивает применение этого устройства.

В патенте 35894 описан выносной циклон, прикрепленный к барабану. В этом устройстве имеется много общего с современными выносными циклонами. Корпус рассчитан на полное рабочее давление, в корпусе организовано вращательное движение сепарируемого пара.

В патенте 312683 применена сложная улитка на несколько оборотов. В современных выносных и внутрибарабанных циклонах применяют входные устройства, в которых пар аналогично этому делает до одного оборота.

В патенте 728630 использован сепарационный эффект поворота потока. В современной энергетике эти устройства не применяются, однако с целью устранения сепарации в криволинейных трубах отбор проб пара производится лишь на прямолинейных участках трубопроводов.

В патентах 100984 и 225154 описываются внутрибарабанные циклоны со встроенными жалюзи. Такие устройства обладают неплохой эффективностью, однако циклоны без внутренних устройств работают лучше.

В патенте 320050 описан циклон, в котором пар движется от центра к периферии. В современных циклонах пар движется от периферии к центру либо вдоль оси. Описываемое устройство интересно как вариант.

В патенте 326033 описан трехзонный линейный центробежный сепаратор. Двухзонный центробежный сепаратор применяется в настоящее время.

Обращает внимание большое разнообразие конструктивного исполнения предложенных сепарационных устройств. Эти сепараторы питаются энергией избыточного давления пара в барабанах котлов. Часть сепараторов устанавливается на линиях насыщенного пара.

Общее свойство описываемых устройств — использование центробежного эффекта для разделения пара и воды.

Как следует из приведенного обзора, основным направлением в развитии и усовершенствовании сепарационных устройств для котлов среднего и низкого давления как в СССР, так и за рубежом является постепенный переход к применению центробежных сепараторов в качестве основных элементов сепарационных устройств. В этом основное сходство развития зарубежных и отечественных сепарационных схем. Однако если за рубежом предпочитают ориентироваться на питательную воду низкого солесодержания, то в СССР успешно освоены схемы ступенчатого испарения с внутрибарабанными циклонами в I ступени и выносными во II ступени. Котлы, оборудованные такими схемами, способны работать

на питательной воде весьма высокого солевого содержания, включая даже морскую воду [Л. 20]. В этом основное различие путей развития сепарационных схем в СССР и за рубежом.

Глава вторая

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПАРА И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

2-1. УСЛОВНАЯ СХЕМА ВНУТРИКОТЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Для успешного решения вопросов, возникающих при наладке работы сепарационных устройств, необходимо хотя бы схематично представить основные процессы, происходящие при разделении пара и воды. Для этой цели можно условно разделить процесс получения пара из воды на следующие четыре этапа (рис. 2-1).



Рис. 2-1. Схема процесса сепарации.

I — образование пара в кипятильных трубах; II — выделение основного количества воды, циркулирующей в котлах; III — гашение пены; IV — улавливание капельной влаги.

получаемого извне тепла вода в кипятильных трубах частично испаряется и из них выходит пароводяная смесь. Хотя в котлах низкого и среднего давления объем пара в этой смеси значителен, но масса воды составляет в ней 90—95%, а пара лишь 5—10%. Это имеет место при кратности циркуляции 10—20, когда на каждый килограмм пара приходится 10—20 и более килограммов воды.

Грубая сепарация. Назначение ее состоит в уменьшении влажности пара с 90—95% до 40—50% путем выделения из потока пароводяной смеси основного количества циркулирующей воды. Из 10—20 кг воды, приходящейся на каждый килограмм пара при входе в барабан, после грубой сепарации остается примерно 1 кг. Для

котлов среднего, а тем более низкого давления эта часть процесса сепарации достаточно эффективно совершается под действием силы тяжести. Скорость подъема паровых пузырей в котловой воде зависит от их размеров, давления пара, солевого содержания воды, а также конфигурации элементов сепарационных устройств.

При среднем и низком давлении большое различие плотности пара и воды обуславливает достаточно на-

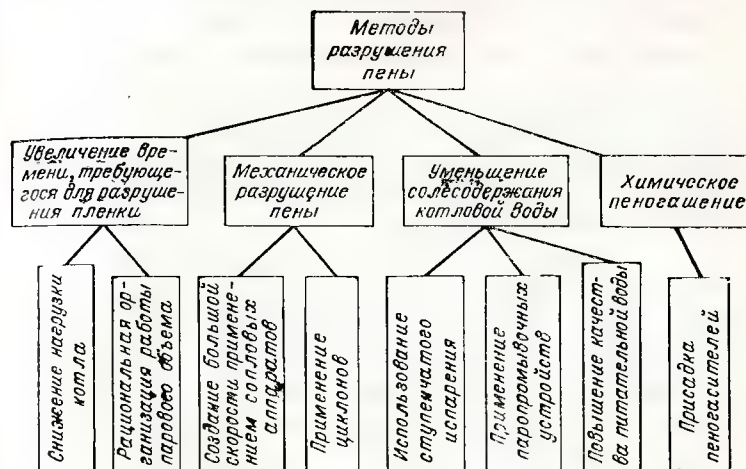


Рис. 2-2. Методы разрушения пены в паровых котлах.

дежное отделение пара из основного количества циркулирующей в контурах воды без специальных устройств. Достаточно лишь обеспечить малую скорость воды в объеме, для чего применимы простейшие устройства типа коробов, разомкнутых снизу.

Разрушение пленки паровых пузырей (гашение пены). На этом этапе происходит снижение влажности примерно с 40 до 10%. Быстрое и надежное разрушение пленки паровых пузырей является наиболее трудной задачей при высоком солевом содержании котловой воды. Для этого применяют разнообразные способы, перечисленные на схеме рис. 2-2.

Увеличение времени, требующегося для разрушения пленки, достигается снижением нагрузки котла либо рациональной организацией работы парового объема. Оба метода широко применяются на практике.

Механическое разрушение пены можно осуществить в различных сопловых аппаратах при создании достаточно большой скорости. Этот способ пока в промышленности не опробован, хотя и позволяет быстро разрушать пленку паровых пузырей. Очень широко распространен способ разрушения пленки в циклонах. На входе сепарируемого пара в циклон всегда имеется сопло, в котором пар приобретает требуемую скорость. По-видимому, разрушение пленки начинается в сопловом аппарате циклона, а в корпусе завершается тонкая сепарация пара и продуктов разрушения паровых пузырей.

Для уменьшения солесодержания котловой воды в зоне разрушения пленки используются: подача питательной воды на зеркало испарения, увеличение продувки организацией ступенчатого испарения; сбор и возврат конденсата, а в отдельных наиболее тяжелых случаях — установка испарителей и паропреобразователей. Все это снижает устойчивость пены, что для котлов среднего и низкого давления является одним из основных факторов улучшения процессов сепарации.

Химическое пеногашение, несмотря на ряд присущих ему положительных свойств (возможность значительного повышения солесодержания котловой воды, повышение нагрузки парового объема), в промышленной энергетике пока достаточно заметного распространения не получило.

Улавливание капельной влаги. После разрушения пленки пузырьков пены в пар попадает большое количество мелких капелек котловой воды, которые требуется отсепарировать. Влажность пара снижается с 10 до 1% и ниже. Эта часть процесса сепарации осуществляется достаточно надежно во всех без исключения типах сепараторов.

Основные усилия конструкторов, наладчиков и эксплуатационного персонала направлены на создание условий возможно более надежного гашения пены.

2-2. ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПАРА

На рис. 2-3 показаны основные источники загрязнения пара.

Вынос котловой воды. В котлах низкого и среднего давления основными источниками загрязнения пара яв-

ляются частицы котловой, реже питательной воды. В паре высокого давления существенную долю примесей составляют растворенные вещества. Вынос частиц котловой воды различают трех видов:

а) в виде мелких капель, увлекаемых потоками пара при малых скоростях;

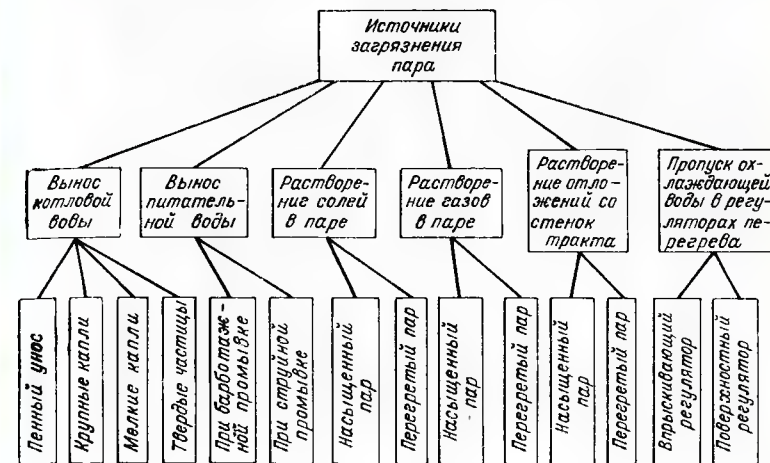


Рис. 2-3. Источники загрязнения пара.

б) в виде крупных капель, попадающих в зоны повышенных скоростей возле паротводящих устройств, откуда они выносятся потоком пара;

в) в виде частиц пены, когда при высоком солесодержании котловой воды на границе раздела воды и пара образуется слой стабильной пены — (пенный унос). Этот вид уноса для котлов низкого и среднего давления наиболее значителен.

Вынос питательной воды. Кроме выноса котловой воды имеет место также вынос питательной воды. В тех случаях, когда питательная вода подается в водяной объем барабана и перемешивается с котловой водой, вынос собственно питательной воды невозможен; когда питательная вода используется для промывки пара, наблюдается вынос частиц питательной воды [Л. 4]. Если солесодержание питательной воды достаточно велико, то

это обуславливает ухудшение качества пара, вырабатываемого котлом.

Растворение солей и газов. В насыщенном и перегретом паре могут растворяться соли, имеющиеся в котловой воде. Наибольшим коэффициентом растворимости обладает кремниевая кислота, вынос которой уже при давлении 40—60 кгс/см² становится вполне заметным.

В паре имеются также растворенные газы: кислород, углекислый газ, азот, аммиак. Кислород и углекислый газ способствуют коррозионным процессам в паровом и конденсатном тракте. Аммиак обуславливает коррозионное разрушение латунных трубок конденсаторов и теплообменников.

Газы попадают в котел с питательной водой в свободном (кислород) либо связанном (аммиак) виде — при аммоний-натрий-катинировании исходной воды. Углекислота — в виде газа и с бикарбонатным ионом, который разлагается в котле с образованием гидроксильного иона и углекислого газа.

Наличие агрессивных газов в паре вызывает коррозию обратных конденсаторов, что приводит к обогащению продуктами коррозии водяного тракта котельных. Газовые составляющие в паре затрудняют электрометрическое определение качества пара.

Растворение отложений, образующихся на стенках тракта.

На стенках змеевиков пароперегревателей отлагается некоторая часть солей, выносимых насыщенным паром с капельками котловой и питательной воды. Отложившиеся на стенках соли затем длительное время растворяются и выносятся перегретым паром. Солевой состав пара в пароперегревателе вследствие этого претерпевает изменения.

Наблюдается и обратное явление — уменьшение солевого содержания пара при движении его по тракту вследствие отложения на стенках части солей на некоторых его участках.

После проведения качественной наладки сепарационных устройств содержание насыщенного пара оказывается значительно меньшим, чем перегретого, так как основная доля примесей в перегретом паре обуславливается вымыванием солей со стенок. Сравнение величин солевого содержания насыщенного и перегретого пара является важным показателем, указывающим на

накопление либо вымывание солей из парового тракта.

В общем случае можно считать, что качество перегретого пара является следствием того динамического равновесия, которое создается между отложившимися и вымываемыми солями по паровому тракту.

Пропуск охлаждающей воды в регуляторах перегрева. Поверхностные регуляторы перегрева могут ухудшать качество пара из-за возможного пропуска охлаждающей воды через неплотности в трубной системе. Поверхностные регуляторы работают на котловой или питательной воде. Охлаждение котловой водой более эффективно, поскольку не дает конденсации пара (давление пара в пароперегревателе всегда ниже, чем в барабане), но случайные пропуски котловой воды более существенно ухудшают пар по сравнению с питательной водой. В современных котлах поверхностные регуляторы на котловой воде не применяют. Поверхностные регуляторы на питательной воде также применяют сравнительно редко ввиду большого запаздывания регулирования.

Как видно из рис. 2-3, определение составляющих примесей в паре представляет трудную задачу, в особенности с учетом того обстоятельства, что все эти составляющие входят в пар в очень малых дозах.

2-3 КЛАССИФИКАЦИЯ КОТЛОВ ПО ВЛАЖНОСТИ ВЫРАБАТЫВАЕМОГО ПАРА

Схема разделения котлов на различные группы в зависимости от влажности получаемого пара показана на рис. 2-4. На этой схеме по оси абсцисс размещены группы котлов различного целевого назначения в порядке убывания влажности вырабатываемого ими пара, а по оси ординат — влажность пара.

К первой группе относятся котлы специального назначения, например котлы хлебопекарной промышленности. Эти котлы состоят из петли, давление в которой поддерживается с большей точностью в требуемых пределах, чем температура. Влажность пара этих котлов составляет 10% и выше.

Вторую группу составляют промышленные котлы без пароперегревателей. Нормой влажности пара для них является 1%. Долголетней практикой установлено, что при такой влажности котлы нормально эксплуатируются без существенных замечаний.

Котлы третьей группы имеют пароперегреватели, но пар их не используется в турбинах; для них нормируемое солесодержание пара составляет 1 мг/кг [Л. 21]. Если принять солесодержание котловой воды

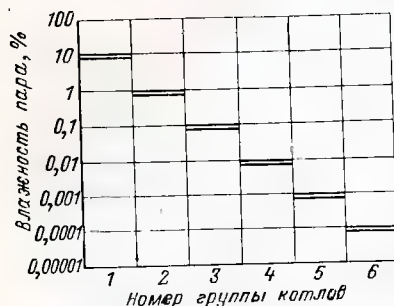


Рис. 2-4. Схема разделения котлов на группы в зависимости от допустимой величины влажности. 1 — котлы специального назначения; 2 — промышленные котлы без пароперегревателей; 3 — промышленные котлы с пароперегревателями; 4 — энергетические котлы; 5 и 6 — испарители.

Как следует из рис. 2-4, влажность пара для различных котлов изменяется весьма значительно. Дифференцированные нормы качества пара для котлов промышленной энергетики были разработаны в 1964 г.

В настоящее время для котлов с пароперегревателями рекомендованы следующие предельные значения содержания натрия в паре:

Давление, кгс/см ²	Содержание натрия, мг/кг
9—14	320
24	100/160
40	60/100

В числителе указаны нормы для энергетических, а в знаменателе — для промышленных котлов. Для котлов без пароперегревателей оставлена норма влажности пара 1%.

в среднем равным 1 000 мг/кг, то влажность такого пара составит 0,1%.

Четвертая группа. Энергетические котлы, пар которых используется для турбин, вырабатывают пар с солесодержанием при среднем давлении—0,3 и 0,2 мг/кг при высоком давлении. При солесодержании котловой воды в выносных циклонах этих котлов 2 000—3 000 мг/кг влажность пара составит 0,01%.

Чувствительные методы анализа качества пара (спектральный и радиоактивный) позволяют определять примеси в ничтожно малых количествах 10^{-13} — 10^{-16} кг/кг, что при котловой воде высокого солесодержания по принятой на рис. 2-4 градации соответствует котлам пятой и более высокой группам.

Большое превышение нормальных значений влажности пара приводит к ухудшению технологических процессов, снижению эксплуатационной надежности котлов, а также снижает к. п. д. котлов. Неоправданно малая влажность пара хотя и не представляет большой опасности, но также может оказаться нежелательной, поскольку может привести к увеличению эксплуатационных расходов на создание более благоприятных условий для работы котлов, например: увеличение продувки, снижение производительности котлов. Лишь выработка пара требуемого качества обусловит экономичную работу котлов и надежную эксплуатацию оборудования.

2-4. ОТБОР ПРОБ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПАРА

Отбор проб пара. Для перегретого пара, в котором нет капелек влаги, искажение величины солесодержания пара при отборе проб обычно не велико; даже в случае существенных отклонений в конструкции парозаборных устройств от оптимальных расчетных вариантов отбираемый пар близок по своему составу к пару в паропроводе.

Для насыщенного пара, являющегося двухфазной средой (пар и капли влаги в нем), правильный отбор проб представляет значительные трудности.

Насыщенный пар [Л. 22] следует отбирать, чтобы не происходило ни обогащения, ни обеднения проб по отношению к истинному солесодержанию, т. е. проба должна быть представительной. Для повышения чувствительности анализов применяют солеконцентраторы, дающие обогащение проб солями, что позволяет уловить даже небольшое ухудшение качества пара.

Применяют несколько типов парозаборных соскобовых или щелевых зондов.

Для сведения к минимуму искажений солесодержания пара из-за изменения его фазового состава при отборе проб зонд располагают в устье пароотводящей трубы (рис. 2-5,з). Капельки влаги при движении пара в трубе частично оседают на стенках. Поэтому отбор проб из устья трубы или на расстоянии 2—4 диаметров трубы дает показания с минимальными погрешностями. Схемы потоков пара показаны на рис. 2-5,а—в.

Скорость пара в отверстии зонда должна быть равной скорости исследуемого потока (подразумевается

средняя скорость пара). В соответствии с этим сечение отверстия соскового зонда определяют следующим способом.

Из условия равенства скоростей следует, что

$$w_z = w_{тр}, \quad (2-1)$$

отсюда

$$\frac{G_{тр}}{G_z} = \frac{f_{тр}}{f_z} \quad (2-2)$$

или

$$f_{z_0} = f_{тр} \frac{G_z}{G_{тр}} \quad (2-3)$$

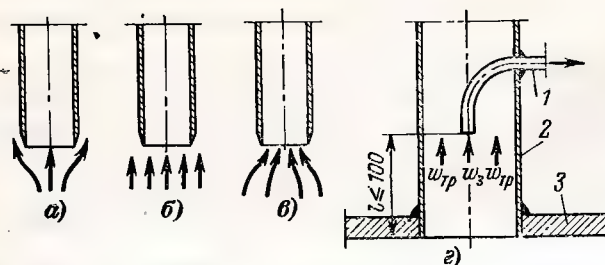


Рис. 2-5. Схема устьевого парозаборного зонда. а — обогатненная проба; б — нормальная проба; в — обедненная проба; г — схема зонда; 1 — расстояние от стенки барабана, мм; 2 — пароводящая труба; 3 — стенка барабана.

Для устьевых однососковых зондов справедлива формула

$$d_z = d_{тр} \sqrt{\frac{G_z}{G_{тр}}} \quad (2-4)$$

Пробы пара из паропроводов отбирают на вертикальных участках. Для получения представительной пробы осуществляется срыв пленки со стенок паропровода, что достигается установкой набора шайб (рис. 2-6), за которыми помещается сосковый либо щелевой зонд. Расчет этих зондов аналогичен расчету устьевого однососкового зонда. В ЦКТИ практикуется установка парозаборных зондов за мерными шайбами, что сокращает объем подготовительных работ.

Для многососковых зондов применяется формула

$$mf_0 = f_{тр} \frac{G_0}{G_{тр}} \quad (2-5)$$

Щелевые зонды рассчитывают по формуле

$$ab = f_{тр} \frac{G_z}{G_{тр}} \quad (2-6)$$

В формулах (2-1) — (2-6):

$w_{тр}$, w_z — скорость пара в трубе и зонде, м/сек; $G_{тр}$, G_z — расход пара через трубу и зонд, кг/ч; $f_{тр}$, f_z — площадь сечения трубы и зонда, м²; $d_{тр}$, d_z — диаметр трубы и зонда, м; m — число сосков; a и b — длина и ширина щели, м.

Расход пара в пароперепускной трубе определяется по уравнению (2-7)

$$G_{тр} = \frac{D_k}{n_{тр}}, \quad (2-7)$$

где D_k — номинальная производительность котла, кг/ч; $n_{тр}$ — число пароводящих труб.

С изменением производительности котла соответственно изменяется скорость пара в пароводящих трубах. Это, как видно из рис. 2-5, естественно, нарушает расчет, так как обедняет или обогащает отбираемую пробу. Например, при понижении производительности капельки влаги, обладающие повышенной инерционностью, не успевают попадать в отверстие зонда (рис. 2-5, в).

Превышение производительности сверх номинальной по той же причине заведомо ухудшает отбираемую пробу (рис. 2-5, а).

Следовательно, количество отбираемой пробы паражужно изменять пропорционально изменению производительности котла в данный момент.

На практике это трудно выполнимо, и обычно устанавливается некоторый постоянный расход (20—100 кг/ч), который и поддерживается неизменным.

В практических расчетах зондов необходимо соблюдать также следующие условия: чтобы пар отбирался по возможности равномерно по всему сечению трубы; ширина щели или диаметр отверстий зонда должны быть не менее 3 мм; сечение пароводящей трубы зонда

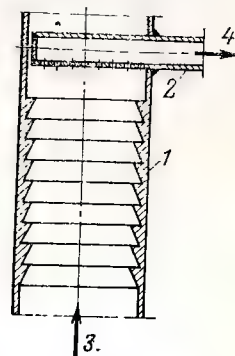


Рис. 2-6. Схема зонда со срывом пленки. 1 — диафрагмы; 2 — зонд; 3 — поток пара; 4 — отборная проба.

должно быть примерно в 2 раза больше суммы сечений парозаборных отверстий.

Для учета возможных ошибок при отборе проб пара ниже приведено несколько примеров явно неправильно выполненных отборов проб.

На рис. 2-7, в показан пример отбора пробы пара не из потока, а из парового объема. В этом случае отбираемая проба, как правило, оказывается «в норме» вне зависимости от истинного соле содержания пара.

На рис. 2-7, а, б показаны примеры устройств, явно обогащающих пробу. Пробы, отбираемые из нижней части горизонтальных паропроводов (рис. 2-7, б), а также из внешних образующих гибов труб (рис. 2-7, а), ухудшают качество пара, которое может быть значительно лучше отбираемой пробы и даже находиться в пределах нормы.

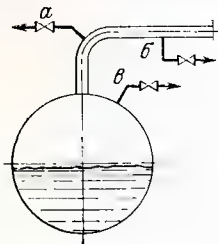


Рис. 2-7. Искращения при отборе проб.

а, б — обогащение пробы; в — обеднение пробы.

выщелачивание солей из стенок пробоотборной посуды.

Таким образом, между видимым и истинным качеством пара имеется заметная разница. В эксплуатации и при наладке необходимо стремиться к всемерному уменьшению этой разницы.

Отобранные пробы охлаждают в воздушных либо водяных холодильниках. Число точек отбора проб, охлаждаемых в одном холодильнике, может изменяться от одной до одного-двух десятков в зависимости от потребности.

Иногда пробоподводящие линии сводят в одну; это неправильно, поскольку всегда возможен пропуск какого-либо вентиля, что приводит к искажению остальных проб.

Показатели качества пара. Для оценки качества пара имеется несколько показателей: влажность, солесодержание, содержание хлоридов, кремниевой кислоты, фосфатов и газовых примесей.

Различные показатели имеют свою область применения в зависимости от параметров пара, типа котла и потребителя пара.

Влажность пара — масса (вес) воды в единице массы пароводяной смеси, выраженная в процентах:

$$W = \frac{g'}{g' + g''} 100\%, \quad (2-8)$$

где W — влажность пара, %; g' — масса воды, кг; g'' — масса пара, кг.

Этот показатель широко используется как в промышленной, так и в стационарной энергетике.

Нормы качества пара по его влажности имеются лишь для некоторых типов паровых котлов [Л. 21].

Влажность пара ранее измеряли с использованием калориметров. В настоящее время применяют косвенные показатели: определение щелочности или солесодержания пара и воды с последующим пересчетом

$$W = \frac{\Pi''}{\Pi'} 100\%, \quad (2-9)$$

где Π'' — щелочность пара, мг-экв/кг; Π' — щелочность котловой воды, мг-экв/кг.

Солесодержание или плотный остаток пара показывает массу различных солей в одном килограмме пара

$$S = \frac{A'}{A' + A''}, \text{ кг/кг}, \quad (2-10)$$

где S — солесодержание пара, кг/кг; A' — масса солей, кг; A'' — масса пара, кг.

Вследствие небольших величин примесей удобнее

3—17

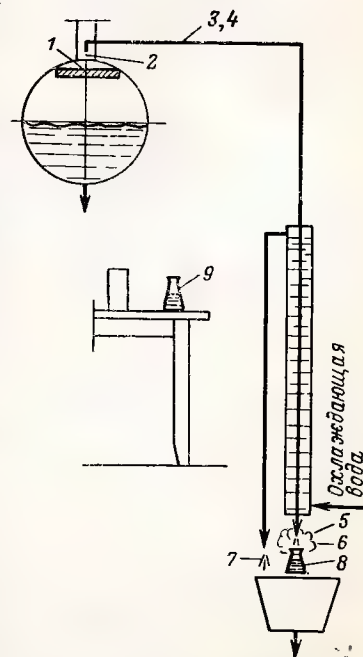


Рис. 2-8. Схема искажений качества пара в процессе отбора пробы.

1 — истинное качество пара; 2 — искажение парозаборным зондом; 3 — отложение и вымывание солей со стен пробоподводящих труб; 4 — вымывание металла труб; 5 — дегазация пробы; 6 — обогащение пробы; 7 — попадание посторонних примесей; 8 — вымывание солей со стенок посуды; 9 — ошибки при анализе и замерах.

выражать солесодержание не в $кг/кг$, а в $мг/кг$ или даже $мкг/кг$.

В эксплуатации определяют и другие показатели качества пара, например содержание хлоридов, кремниевые кислоты, фосфатов.

Солесодержание пара определяется несколькими способами (выпаркой плотного остатка, спектральным анализом, методом меченых атомов), но наиболее распространен метод определения электропроводности конденсата с применением различных солемеров.

В паре имеются также газовые примеси: аммиак, углекислый газ, кислород, водород и др., которые существенно влияют на условия эксплуатации энергетического оборудования.

Суммарное солесодержание пара определяется уравнением

$$\Sigma S = (\Delta S_{п.п} + \Delta S_{п.п}) k_{отб} + \Delta S_{отб}, \quad (2-11)$$

где ΣS — суммарное солесодержание пара, $мг/кг$; $\Delta S_{п.п}$ — солесодержание насыщенного пара, $мг/кг$; $\Delta S_{п.п}$ — солесодержание перегретого пара, $мг/кг$; $k_{отб}$ — коэффициент обогащения пробы при отборе; $\Delta S_{отб}$ — видимый прирост солесодержания пара из пробоподводящего тракта, $мг/кг$.

$$\Delta S_{п.п} = \Delta S_{вып} + \Delta S_{раств} + \Delta S_{газ} + \Delta S_{отмыв}, \quad (2-12)$$

где $\Delta S_{вып}$ — составляющая выноса частиц котловой воды, $мг/кг$; $\Delta S_{раств}$ — составляющая растворенных в паре веществ, $мг/кг$; $\Delta S_{газ}$ — газовая составляющая, $мг/кг$; $\Delta S_{отмыв}$ — составляющая отмываемых отложений, $мг/кг$.

$$\Delta S_{п.п} = \Delta S_{отмыв} + \Delta S_{рег} + \Delta S_{раств}, \quad (2-13)$$

где $\Delta S_{рег}$ — влияние регулятора перегрева (пропуск охлаждающей воды), $мг/кг$.

Как видно из формул (2-11) — (2-13), суммарное солесодержание пара состоит из ряда слагаемых, так что определение мест ухудшения пара является достаточно сложной задачей, от правильности разрешения которой зависит успешность наладочных работ и надежность дальнейшей эксплуатации котла.

Для примера ухудшения качества пара вследствие вымывания солей можно привести результаты теплотехнического испытания котла. Первичная обработка материалов наблюдений показала зависимость качества (солесодержания) пара от времени работы котла

(рис. 2-9, а). После наложения кривых получилась вполне четкая зависимость качества пара от длительности работы котла после резкого ухудшения качества

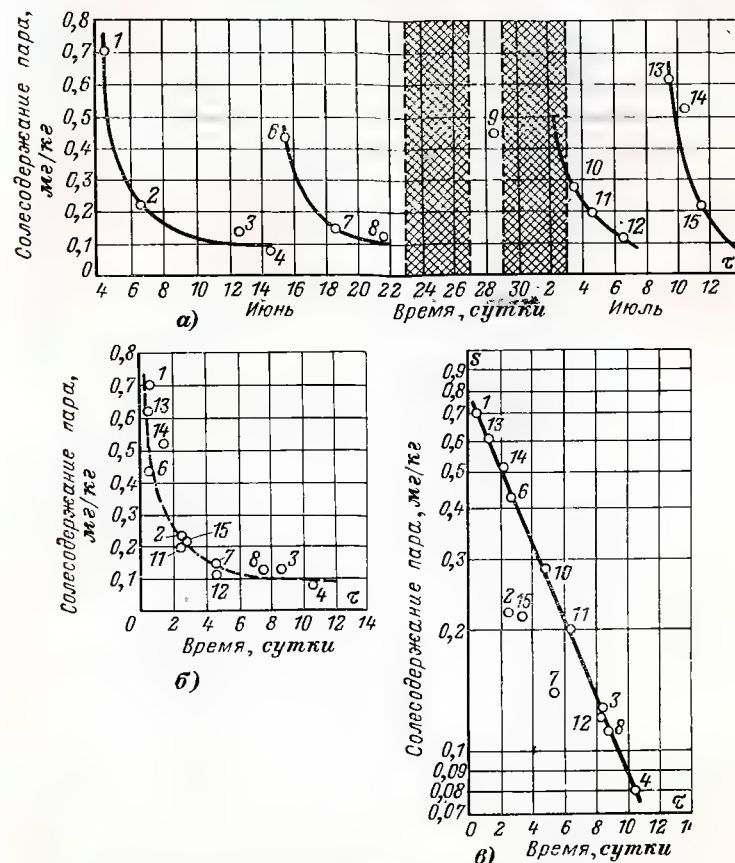


Рис. 2-9. Вымывание солей перегретым паром.

а — разрозненные графики зависимости солесодержания перегретого пара от времени работы котла; б — наложенные графики; в — наложенные графики в логарифмических координатах. 1—15 — номера опытов; заштрихованные участки — остановки котла. Анализ качества пара — методом накопления ионов ($D_K = 150 \text{ т/ч}$; $p_K = 85 \text{ кгс/см}^2$; $H_0 = 50 \text{ мм}$).

пара (рис. 2-9, б). В логарифмических координатах полученная зависимость имеет вид прямой линии, что указывает на наличие строгой закономерности процесса вымывания солей (рис. 2-9, в).

2-5. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ПАРА

Определение качества пара представляет большие трудности. Количество примесей в паре изменяется в очень больших пределах, что обусловило применение для этой цели нескольких принципиально различных методов контроля (рис. 2-10). В различные периоды

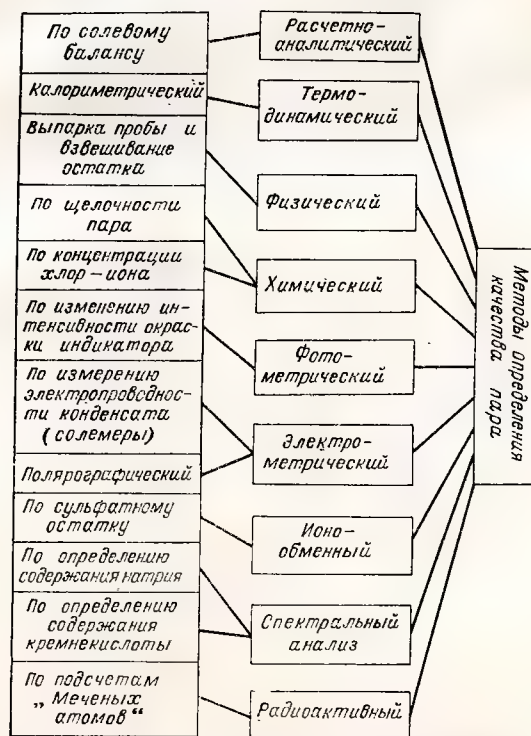


Рис. 2-10. Методы определения качества пара.

в зависимости от параметров пара и типов котлов применялись различные методы контроля.

Расчетно-аналитический метод. По солевому балансу количество солей, поступающих в котел и удаляемых из котла с продувкой, легко определить расчетным путем при известных значениях солей содержания и расхода питательной и продувочной воды.

Заметное расхождение данных подсчета будет указывать на унос солей паром. Этот метод применим при больших значениях влажности пара (5—10% и выше).

Термодинамический метод определения влажности пара заключается в том, что отбираемая проба дросселируется и поступает в сосуд, покрытый изоляцией. Температура пара в сосуде измеряется и регистрируется с большой точностью. Сухой насыщенный пар низкого и среднего давления после дросселирования становится слабо перегретым. Резкое ухудшение качества пара вызывает снижение температуры перегретого пара, что и фиксируется как повышение влажности.

Физический метод (определение массы сухого остатка в пробе пара) заключается в том, что отобранная проба пара конденсируется и полученный конденсат выпаривается в платиновой чашке, а полученный остаток взвешивается. Для предотвращения попадания пылинок чашку с пробой часто помещают под колокол, вследствие чего такая выпарка получила наименование герметизированной. Несмотря на простоту этот метод широкого распространения не получил из-за невысокой чувствительности и весьма значительной трудности получения достоверной пробы.

Химический метод определения качества пара основан на том, что наличие капелек котловой воды в паре обуславливает щелочную реакцию. Нейтрализуя определенное количество пробы пара деци- или анти- нормальной кислотой в присутствии индикаторов, определяют количество потребной для этого кислоты. По количеству и концентрации кислоты определяют щелочность пара, а зная щелочность котловой воды, определяют влажность пара.

Этот метод получил широкое распространение в эксплуатационной и наладочной практике. Кроме щелочности иногда определяют концентрацию хлор-иона, а также ряд других показателей.

Фотометрический метод определения качества пара основан на том, что в зависимости от изменения концентрации отдельных элементов изменяется интенсивность окраски соответствующих индикаторов, что и улавливается чувствительными фотоэлементами. Фотометрический метод нашел широкое применение для лабораторных анализов.

Электрометрический метод определения со-
лесодержания пара основан на том, что большинство со-
ставляющих примесей в конденсате пара находится
в виде ионов. Вследствие малой концентрации веществ

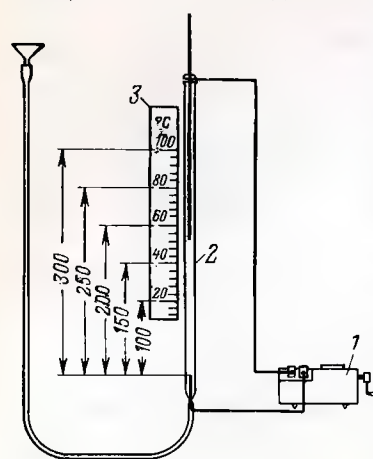


Рис. 2-11. Контроль соле-
содержания пара по лабораторному
солемеру с мегомметром.

1 — мегомметр на 0,5 кв; 2 — датчик
из стандартной бюретки; 3 — темпе-
ратурная шкала.

что в исследуемом растворе измеряют токи диффузии
при различной напряженности электрического поля
(рис. 2-12).

В датчик, представляющий собой колбу с налитой
на дно ртутью, наливается исследуемый раствор 2.
В датчик через капилляр 1 капает ртуть. К обоим ртут-
ным электродам через потенциометр подводится напря-
жение.

Для движения ионов различных веществ необходима
некоторая минимальная напряженность электрического
поля. При проведении анализа плавно увеличивают
напряжение на электродах датчика и измеряют силу то-
ка в цепи чувствительным микроамперметром 4 (обычно
регистрирующим с применением усилителя).

В результате получается характерная диаграмма
(рис. 2-12, б), на которой при определенном напряжении
можно судить о природе ионов. Высоты порогов K_1 , K_2 ,

K_3 пропорциональны концентрации ионов отдельных ве-
ществ. Таким образом, удается определить несколько
компонентов одновременно.

Ввиду высокой чувствительности и сравнительно ма-
лой затраты труда на анализы этот метод, возможно,
найдет более широкое приме-
нение.

Ионообменный ана-
лиз заключается в том, что
большое количество конденсата
исследуемого пара пропускают
через колонку с ионообменным
материалом.

Уловленные ионы затем от-
мывают раствором кислоты и
определяют их количество.
После этого производят пере-
счет уловленных веществ на
количество пропущенного че-
рез колонку конденсата.

Имеет место обогащение
проб методом химического кон-
центрирования (ВТИ). Концен-
трация загрязнений может
быть повышена в десятки раз,
что позволяет применить мето-
ды обычного анализа.

Спектральный анализ
качества пара основан на том,
что исследуемый конденсат
вводится в пламя горелки. Ато-
мы натрия либо другого элемента, содержание которого
требуется определить, возбуждаются в пламени и начи-
нают излучать световую энергию определенной частоты.

Через монохроматические фильтры эта световая
энергия выделяется и подается на фотосопротивление,
включенное в электрическую схему. Чувствительный
микроамперметр измеряет изменение силы тока в цепи
фотосопротивления.

В соответствии с предварительной тарировкой при-
бора определяется содержание различных элементов
в паре. Высокая чувствительность этого метода обеспе-
чила широкое применение его в стационарной энергети-
ке. Имеются отдельные успешные опыты применения

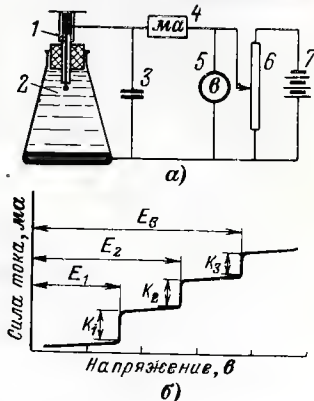


Рис. 2-12. Полярографи-
ческий анализ.

а — схема прибора; б — поляро-
грамма; 1 — капилляр со ртутью;
2 — исследуемая проба; 3 — кон-
денсатор; 4 — микроамперметр;
5 — вольтметр; 6 — потенцио-
метр; 7 — батарея; K_1 , K_2 , K_3 —
величины, пропорциональные
концентрации отдельных ве-
ществ; E_1 , E_2 , E_3 — напряжения,
характеризующие природу ис-
следуемых веществ.

спектрального анализа и в промышленной энергетике.

Радиоактивный метод анализа состоит в следующем. В котел вводят радиоактивные изотопы некоторых веществ. При выносе их паром удается подсчитать количество возбужденных атомов. Этот метод, обладающий наибольшей чувствительностью из всех известных методов анализа, в промышленной энергетике пока не применяется. Одной из причин этого является недостаточная для целей промышленной энергетике чувствительность других, более простых методов контроля качества пара.

Глава третья ОБЪЕМНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

3-1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ

Рациональная организация работы парового объема барабанов предусматривает равномерное распределение потоков пара по всему паровому объему с тем, чтобы получить одинаковые скорости сепарируемого пара. Это создает оптимальные условия для выделения капелек воды из потока.

Чем мельче капли воды, тем труднее вывести их из потока, так как с уменьшением размеров капелек увеличивается их парусность.

Объем капелек влаги не остается неизменным — мелкие капли сравнительно быстро испаряются, крупные же капли могут увеличиваться. В основе этого лежит известное явление, состоящее в том, что давление пара над выпуклой поверхностью больше, чем над плоской. Кроме того, возможно соударение капель, приводящее к их слиянию и укрупнению. Все это чрезвычайно усложняет математическое исследование процесса сепарации.

Влажность пара изменяется согласно уравнению

$$W = AD_k^n, \quad (3-1)$$

где W — влажность пара, %; A — постоянный коэффициент; D_k — производительность котла, $t/ч$; n — показатель степени.

Серией тщательно проведенных экспериментов показано, что в работе сепарационных объемов можно отметить ряд существенно различных зон [Л. 22].

В первой зоне (рис. 3-1) при малой нагрузке парового объема зависимость качества пара от нагрузки выражается слабо — показатель степени $n=0,75 \div 1$.

Во второй зоне зависимость качества пара от нагрузки проявляется более существенно — показатель степени $n=3 \div 5$. В третьей зоне $n=7 \div 20$ и небольшие изменения нагрузки резко меняют влажность пара.

Наиболее благоприятной зоной для работы котла является первая. Промышленные и отопительные котлы могут работать во второй зоне. При этом вырабатываемый ими насыщенный пар имеет большую влажность, но нормальная эксплуатация котлов и технологического оборудования не нарушается. Экономичная длительная работа в третьей зоне возможна лишь для нескольких типов котлов.

Высота парового объема оказывает большое влияние на влажность вырабатываемого пара. С ее увеличением до 700—800 мм качество пара улучшается. Вследствие этого в барабанах малых диаметров получение пара высокого качества представляет большие трудности.

Солесодержание котловой воды влияет на солесодержание пара, поскольку в котлах низкого и среднего давления основное количество примесей в паре обуславливается выносом капелек воды. Кроме того, с увеличением солесодержания котловой воды выше предельного значения отмечается резкое ухудшение качества пара, связанное, по-видимому, с образованием пены. Уровень воды, показываемый водоуказательными колонками, не соответствует действительному уровню пароводяной смеси в барабане (рис. 3-2).

Способ ввода пароводяной смеси в барабан влияет на процессы сепарации в нем. Применяют два типа ввода: под уровень — в водяное пространство, и над уровнем — в паровое пространство барабанов (рис. 3-3).

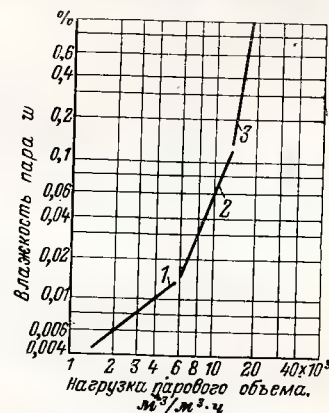


Рис. 3-1. График зависимости влажности пара от нагрузки парового объема.
1 — зона малого уноса; 2 — вынос капелек; 3 — вынос пены.

Ввод пароводяной смеси под уровень гасит кинетическую энергию струй, но создает предпосылки для интенсивного пенообразования. Ввод пароводяной смеси в паровое пространство требует установки устройств (типа жалюзи) для гашения ее кинетической энергии.

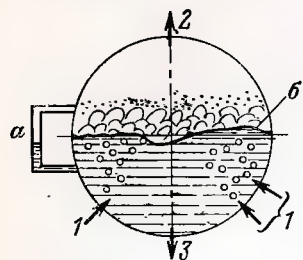


Рис. 3-2. Положение уровня в водоуказательной колонке а и барабане б.
1 — ввод смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды.

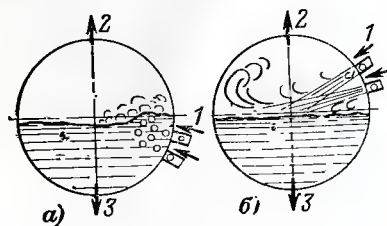


Рис. 3-3. Способы ввода пароводяной смеси в барабан.
а — ввод под уровень; б — ввод над уровнем; в — ввод пароводяной смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды.

Барабаны котлов, выполняя несколько функций, служат также объемными сепараторами для разделения пара и воды. Эффективность сепарации зависит от ряда причин: солесодержания котловой воды, места ввода смеси в барабан, уровня воды в нем, нагрузки парового объема.

3-2. ВКЛЮЧЕНИЕ ПАРОВЫХ ОБЪЕМОВ

В настоящее время многобарабанные котлы сняты с производства, но еще большое количество их эксплуатируется. Организация оптимальных режимов работы этих котлов представляет достаточно сложную задачу.

Первоначально применяли схему с последовательным включением барабана и сухопарника (рис. 3-4, а). Так как объем сухопарника меньше парового объема барабана, то в случае ухудшения качества пара в барабане сухопарник оказывался малоэффективным элементом сепарации. В настоящее время котлы с сухопарниками не выпускают ввиду малой эффективности последних.

В широко распространенных трехбарабанных котлах два верхних барабана включены по пару последовательно. Пар из переднего барабана поступает в задний.

Предельная производительность котла обуславливается в этом случае нагрузкой объема заднего барабана.

Для улучшения условий сепарации в заднем барабане применяют пароперепускные короба как с открытыми торцами [Л. 23], через которые может переходить часть пара, уравнивая тем самым давление в объемах, так и с глухими коробами (рис. 3-4, б); наряду с улуч-

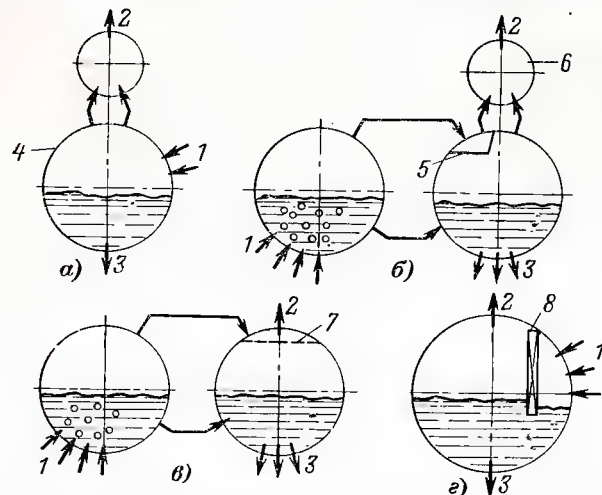


Рис. 3-4. Схемы включения паровых объемов.
а — последовательное; б — параллельное; в — параллельное без сухопарника; г — последовательное в одном барабане.
1 — ввод пароводяной смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды; 4 — барабан; 5 — пароперепускной короб; 6 — сухопарник; 7 — пароприемный потолок; 8 — жалюзийная перегородка.

шением условий сепарации применение этих устройств обуславливало значительное расхождение положения уровня воды в барабанах.

Применяют также установку в заднем барабане перфорированных пароперепускных коробов (рис. 3-4, в) в виде пароприемных потолков (опробовано автором в 1957 г. в котельной Первоуральского завода «Хром-пик»).

Пар переднего барабана не перегружает сепарационного объема заднего барабана, а для пара заднего барабана имеется выход через отверстия перфорированного короба — потолка. Конструкция оказалась несложной и достаточно надежной в эксплуатации.

Применение перфорированного короба-потолка позволяет организовать параллельную работу объемов в трехбарабанных котлах без сухопарников, чего нельзя было сделать при схеме на рис. 3-4,б.

Замена последовательного включения паровых объемов на параллельное улучшает работу сепарационных устройств котла в целом благодаря уменьшению нагрузки заднего барабана [Л. 24].

Третьей разновидностью схемы последовательного включения паровых объемов являются двухбарабанные котлы с предвключенными барабанами малого диаметра. В малом верхнем барабане осуществляется предварительная «грубая» сепарация пара и воды. В основной барабан пар и вода поступают по различным пучкам труб. Котлы с предвключенными барабанами, получившие широкое распространение, в последнее время с производства сняты. Более целесообразным оказалось изготовление однобарабанных котлов с барабанами увеличенных размеров.

Разновидностью схемы с последовательно включенными паровыми объемами являются также однобарабанные котлы с перегородками внутри барабана (рис. 3-4,г), что способствует лучшей организации работы основной части сепарационного объема.

Немаловажное значение для надежной работы котла имеет сепарация пузырьков пара из котловой воды. В случае попадания пузырьков пара в опускные трубы уменьшается движущий напор циркуляционных контуров. Как показали работы МЭИ, основным фактором, влияющим на интенсивность увлечения паровых пузырьков в опускные трубы, является скорость воды в них [Л. 25].

Максимальное использование паровых объемов достигается тогда, когда первому по ходу пара барабану или отсеку предназначается роль «грубого» сепаратора. В тех же случаях, когда в предвключенном барабане осуществляется тонкая сепарация, замена последовательного включения на параллельное обуславливает улучшение процесса сепарации вследствие разгрузки одного из барабанов.

3-3. РАСЧЕТ НАГРУЗКИ ПАРОВЫХ ОБЪЕМОВ

Гидравлический расчет элементов сепарации выполняют после выбора требуемых сепарационных устройств.

До настоящего времени еще не разработана методика расчета собственно сепарирующей способности сепарационных устройств, а поэтому не представляется возможным произвести расчет ожидаемого солевого содержания пара при установке различных сепарационных устройств; фактическая работоспособность сепарационных устройств определяется при теплотехнических испытаниях котла (см. ниже).

В задачу гидравлического расчета сепараторов входит: определение скоростей потоков пароводяной смеси, воды и пара в различных сечениях; определение массовой и объемной нагрузки паровых объемов; выявление степени неоднородности нагрузки паровых объемов; определение перепада давления по отдельным точкам пароводяного тракта и положения уровней воды в отсеках.

Особенно важной задачей расчета является определение гидравлического сопротивления различных устройств для циркуляционных контуров, что предопределяет надежность эксплуатации котлов.

На основании многочисленных эксплуатационных и экспериментальных данных разработан ряд рекомендаций для выбора допустимых скоростей пара и воды в отдельных элементах сепараторов.

Задачей гидравлического расчета является проверка соответствия получаемых значений скоростей потоков с установленными нормативами.

В случае существенных расхождений изменяют конструкцию отдельных узлов сепараторов (площадь поперечного сечения, число сепараторов) либо применяют другой тип сепараторов.

Расчет дает возможность выбирать оптимальные конструктивные варианты устройств — площадь пароприемных потолков, площадь паро- и водоперепускных коробов.

При конструировании сепараторов, имеющих отличие от ранее применявшихся, задачей гидравлического расчета является определение как возможных границ работоспособности этих устройств, так и ожидаемой надежности эксплуатации котла в целом.

Как показывает практика, надежность эксплуатации котлов в значительной степени зависит от правильности гидравлического расчета элементов сепарации.

Ниже приведена одна из возможных методик гидравлического расчета элементов сепарационных устройств

различных типов, включающая минимально необходимые показатели.

Расчеты целесообразно проводить не только для вновь разрабатываемых конструкций, но также и для проверки работающих сепараторов с целью выявления возможности улучшения отдельных показателей работы котла — повышение его производительности, экономичности и надежности эксплуатации.

Различают массовую и объемную нагрузку активного парового объема.

Массовая нагрузка определяется по формуле

$$A_{\text{мас}} = \frac{D_{\text{к}}}{V_{\text{акт}}}, \quad (3-2)$$

где $A_{\text{мас}}$ — массовая нагрузка, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$; $D_{\text{к}}$ — производительность котла, $\text{кг}/\text{ч}$; $V_{\text{акт}}$ — активный паровой объем, м^3 .

Объемная нагрузка определяется по формуле

$$A_{\text{об}} = \frac{D_{\text{к}}}{V_{\text{акт}} \rho''}, \quad (3-3)$$

где $A_{\text{об}}$ — объемная нагрузка, $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$; ρ'' — плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$.

С повышением давления пара допустимая массовая нагрузка парового объема возрастает, а объемная понижается. Кроме нагрузки парового объема определяют нагрузку зеркала испарения.

Массовая нагрузка зеркала испарения составляет

$$B_{\text{мас}} = \frac{D_{\text{к}}}{F}, \quad (3-4)$$

где $B_{\text{мас}}$ — массовая нагрузка зеркала испарения, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; F — площадь зеркала испарения, м^2 .

Объемная нагрузка зеркала испарения определяется по формуле

$$B_{\text{об}} = \frac{D_{\text{к}}}{F \rho''}. \quad (3-5)$$

При подсчете нагрузки парового объема в расчет принимается не весь паровой объем, а лишь его активная часть, участвующая в работе.

Следовательно, в каждом случае можно ввести коэффициент использования парового объема

$$\eta_{\text{об}} = \frac{V_{\text{акт}}}{V}, \quad (3-6)$$

где $\eta_{\text{об}}$ — коэффициент использования парового объема;

$V_{\text{акт}}$ — активный паровой объем, м^3 ;

V — весь паровой объем барабана, м^3 .

Активным паровым объемом считается объем, в котором организованы движение пара и отвод сепарируемой влаги. Пространство у торцов барабана, а также пространство, занятое паросборными устройствами, не участвует в процессе сепарации.

Улучшать работу парового объема следует прежде всего увеличением активной его части, добиваясь того, чтобы

$$\eta_1 < \eta_2, \quad (3-7)$$

где η_1 , η_2 — соответственно коэффициенты использования парового объема до и после переделок.

Важным показателем эффективности работы парового объема является скорость подъема пара в нем. Расчет подъемной скорости ведется в следующем порядке.

Секундный объем пара в барабане составляет

$$V''_{\text{сек}} = \frac{D_{\text{к}}}{3600 \rho''}, \quad \text{м}^3/\text{сек}. \quad (3-8)$$

Активная площадь зеркала испарения (или площадь пароприемного потолка)

$$F_{\text{пот}} = ab,$$

где $F_{\text{пот}}$ — площадь пароприемного потолка, м^2 ;

ab — соответственно длина и ширина потолка, м .

Подъемная скорость пара

$$w'' = \frac{V''_{\text{сек}}}{F_{\text{пот}}}, \quad \text{м}/\text{сек}.$$

На основании экспериментальных работ и эксплуатационных наблюдений установлена величина допусти-

мой подъемной скорости пара в зависимости от давления:

Давление, кгс/см^2	10	16	43
Допустимая скорость подъема пара, м/сек	1,0	0,8	0,3

С повышением давления пара в барабане допустимая подъемная скорость уменьшается, в соответствии с этим снижается объемная нагрузка [Л. 26]. Однако допустимая массовая нагрузка объема с повышением давления возрастает из-за более быстрого роста плотно-

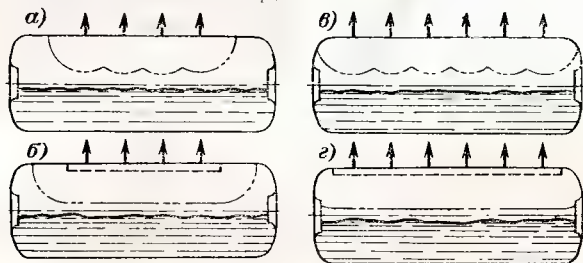


Рис. 3-5. Организация активного парового объема.

а — концентрированное расположение пароводящих труб; б — концентрированный отбор с установкой пароприемного потолка; в — распределение пароводящих труб по всей длине барабана; г — то же с установкой пароприемного потолка.

сти пара. Значения скорости пара приведены для котловой воды с небольшим содержанием (500—700 мг/кг). С увеличением содержания воды значения допустимой подъемной скорости пара уменьшаются.

Расчеты показывают, что для повышения работоспособности объемных сепараторов необходимо: увеличивать активную часть парового объема, понижать (в допустимых пределах) уровень воды в барабанах, увеличивать активную площадь зеркала испарения.

Для улучшения работы парового объема требуется размещать пароводящие трубы по всей длине барабана (рис. 3-5, в) вместо показанного на рис. 3-5, а размещения их на части длины барабана либо внутри барабана устанавливать пароприемный потолок, выравнивающий поток

пара по барабану (рис. 3-5, б). Хорошие результаты дает одновременное применение обоих этих мероприятий (рис. 3-5, г).

Для улучшения работы парового объема иногда искусственно понижают его нагрузку. Так, например, в солевых отсеках нагрузка парового объема, как правило,

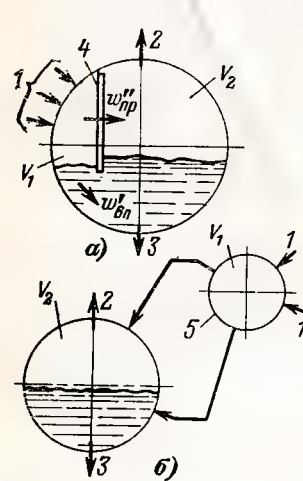


Рис. 3-6. Рациональные схемы последовательно включенных паровых объемов.

а — установка перегородки 4 в барабане; б — установка предвключенного барабана 5; 1 — ввод пароводящей смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды.

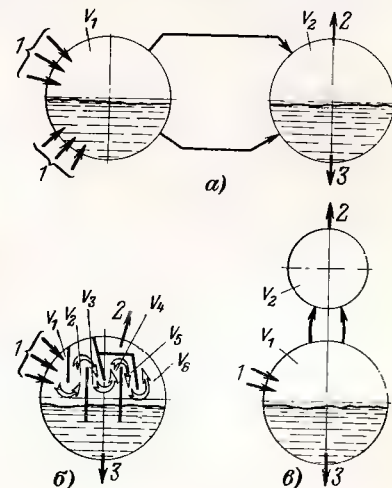


Рис. 3-7. Инерационное включение паровых объемов.

а — последовательное включение равных объемов; б — многократное последовательное включение объемов; в — барабан с сухопарником; 1 — ввод пароводящей смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды.

принимается в 1,5—2 раза меньшей по сравнению со средней нагрузкой парового объема. Это создает предпосылки для повышения содержания котловой воды в этих отсеках.

В случае последовательного включения паровых объемов целесообразность каждой конкретной схемы можно проверить расчетом. Общее правило в данном случае таково: каждый последующий паровой объем должен иметь меньшую нагрузку по сравнению с предвключенным, что позволяет организовать более тонкую сепарацию в каждой последующей ступени.

В свете этого целесообразными оказываются схемы, показанные на рис. 3-6, а псевдочными — на рис. 3-7.

Перегруженные первичные объемные сепараторы выдают пар высокой влажности в пределах 50—90%, что и необходимо принимать во внимание при расчетах.

Последовательное включение перегруженных сепараторов не может обусловить надежную сепарацию пара. Поэтому устройства типа, показанного на рис. 3-7,б, оказываются большей частью неработоспособными.

В практике сравнительно редко применяют чисто объемные сепараторы. Почти всегда в барабанах имеются и иные устройства.

Для нормальной работы парового объема нужно организовать поле скоростей в нем так, чтобы максимальная скорость отдельных потоков не превышала некоторых предельных значений, например для котлов среднего давления 0,3—1 м/сек.

Превышение этих значений приводит к повышению влажности пара на выходе из объемного сепаратора, так как потоки неотсепарированного пара с большой скоростью подходят к парозаборному устройству.

В отдельных случаях несоответствие между данными расчета и наблюдаемыми результатами работы парового объема объясняется наличием местных потоков пара с повышенными скоростями, а потому обязательным условием, обеспечивающим нормальную работу паровых объемов, является выравнивание в них скоростей потоков пара.

3-4. РАСЧЕТ ПАРОПЕРЕПУСКНЫХ И ВОДОПЕРЕПУСКНЫХ СЕЧЕНИЙ

Рассмотрим пример одного из часто встречающихся случаев определения разницы уровней между солевыми и чистым отсеками в котлах с двухступенчатым испарением (рис. 3-8) применительно к котлу (БКЗ-75/39).

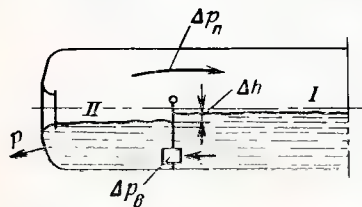


Рис. 3-8. Схема двухступенчатого испарения.

I — первая ступень испарения; II — вторая ступень испарения; p — продувка.

Часть исходных данных известна из теплового расчета котла и конструктивных данных барабана. Производительность котла $D_k = 75$ т/ч; давление пара в барабане $p_k = 40$ кгс/см²; производительность II ступени

испарения $D_{co} = 9$ т/ч; продувка непрерывная $p = 5\%$; влажность пара солевого отсека $W_{II} = 30\%$; диаметр водоперепускной трубы $d_{тр} = 150$ мм; сечение пароперепуска $F'' = 0,1$ м².

Частично исходные данные взяты из эксплуатационной характеристики котла (производительность, давление), частично — из условий воднохимического режима котельной (величина продувки).

Производительность отсека принята по имеющейся производительности одной из панелей боковых экранов. Влажность пара солевого отсека принята ориентировочно по материалам проведенных ранее исследований в аналогичных условиях. Остальные данные взяты конструктивно; если они окажутся неприемлемыми (например, мал диаметр водоперепуска), можно будет принять другие значения, произведя соответствующий пересчет.

Определение перепада давления на водоперепускной трубе.

Массовый расход воды через водоперепускную трубу, определяемый по формуле

$$G' = D_{co}(1 + W''_{co}) + \frac{p}{100} D_k, \quad (3-9)$$

составит

$$G' = 9(1 + 0,30) + \frac{5}{100} \cdot 75 = 15,5 \text{ т/ч.}$$

Секундный объем воды

$$V'_{сек} = \frac{G'}{3600\rho'}, \quad (3-10)$$

$$V'_{сек} = \frac{15,5 \cdot 10^3}{3600 \cdot 800} = 0,00536 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Скорость воды в водоперепускной трубе

$$w' = \frac{V'_{сек}}{F'}, \quad (3-11)$$

$$w' = \frac{0,00536}{\frac{3,14}{4} \cdot 0,15^2} = 0,31 \text{ м/сек,}$$

где F' — сечение водоперепускной трубы, м².

Коэффициент сопротивления водоперепускной трубы подсчитывается по данным [Л. 39]:

$$\Sigma \xi_{тр} = \xi_{вх} + \xi_{пов} + \xi_{лин} + \xi_{вых}, \quad (3-12)$$

где $\Sigma \xi_{тр}$ — суммарный коэффициент сопротивления трубы; $\xi_{вх}$ — коэффициент сопротивления входа; $\xi_{пов}$ — коэффициент сопротивления поворота; $\xi_{лин} = \frac{L}{d} \lambda$ —

линейный коэффициент сопротивления; L , d — соответственно длина и диаметр трубы, m ; λ — коэффициент, учитывающий шероховатость стенок трубы; $\xi_{вых}$ — коэффициент сопротивления выхода.

Пренебрегая линейным сопротивлением, определяем значение суммарного коэффициента сопротивления трубы

$$\Sigma \xi_{тр} = 1 + 0 + 0 + 1 = 2.$$

Далее определяют перепад давления по формуле Дарси:

$$\Delta p' = p' \sum \xi_{тр} \frac{w'^2}{2}, \quad (3-13)$$

$$\Delta p' = 800 \cdot 2 \frac{0,31^2}{2} = 77 \text{ н/м}^2.$$

Определение сечений пароперепускных труб.

Объемный расход пара, определяемый по формуле:

$$D''_{co} = \frac{D_{co}}{p''}, \quad (3-14)$$

составит

$$D''_{co} = \frac{9000}{20,2} = 445 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Секундный объем пара

$$V''_{сек} = \frac{D''_{co}}{3600}, \quad (3-15)$$

$$V''_{сек} = \frac{445}{3600} = 0,124 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Скорость пара в пароперепускном окне

$$w'' = \frac{V''_{сек}}{F''}, \quad (3-16)$$

$$w'' = \frac{0,124}{0,1} = 1,24 \text{ м/сек}.$$

Перепад давления на пароперепуске

$$\Delta p'' = p_{вп} \sum \xi \frac{w''^2}{2}. \quad (3-17)$$

Плотность влажного пара определяется по формуле:

$$\frac{1}{\rho_{вп}} = \frac{x}{\rho'} + \frac{1-x}{\rho''}, \quad (3-18)$$

где x — степень влажности пара, равная в данном случае 0,3;

$$\frac{1}{\rho_{вп}} = \frac{0,3}{800} + \frac{1-0,3}{20,2} = 0,0037 + 0,0346 \approx 0,038 \text{ м}^3/\text{кг},$$

откуда

$$\rho_{вп} = \frac{1}{0,038} = 26,3 \text{ кг/м}^3.$$

Подставив это значение в уравнение (3-17) и приняв $\Sigma \xi = 1,5$, получим:

$$\Delta p'' = 26,3 \cdot 1,5 \cdot \frac{1,24^2}{2} = 30 \text{ н/м}^2.$$

Разбежка уровней между отсеками определяется по формуле:

$$\Delta H = \frac{\Delta p' + \Delta p''}{\rho (p' - p'')}, \quad (3-19)$$

$$\Delta H = \frac{77 + 30}{9,8 (800 - 20,2)} = 0,0145 \text{ м}.$$

Разбежка уровней получилась незначительной, что позволяет оставить выбранные значения площадей пароперепусков без изменений.

3-5. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ СЕПАРАТОРОВ

В барабанных котлах вся пароводяная смесь подается в барабан. Штуцера, подводящие пароводяную смесь, у различных котлов размещены по-разному. Вблизи торцов барабана часто подводят пароводяную смесь от боковых экранов концентрированно, что приводит к резкому повышению скорости пара в этих местах (рис. 3-9). Часть подводящих труб введена в водяное пространство барабана, что составляет дополнительные трудности при конструктивной разработке устройств, организующих работу парового объема.

Отбор пара также выполняют неодинаково: одной трубой, двумя — четырьмя трубами, рядом труб малого

диаметра. В каждом отдельном случае приходится применять различные конструктивные решения.

Подачу питательной воды в барабан выполняют весьма разнообразно. При кипящих водяных экономайзерах требуется перед подачей смеси в основной паровой объем барабана осушать гребную сепарацию

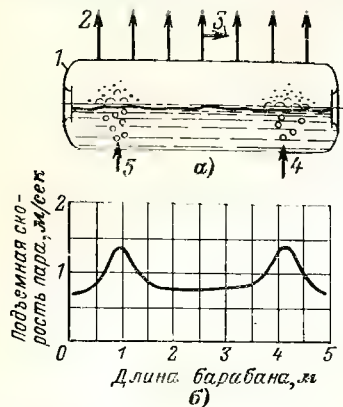


Рис. 3-9. Концентрированный подвод пароводяной смеси в барабан.

а — схема устройства; б — поле подъемных скоростей пара в барабане; 1 — барабан; 2 — паропроводящие трубы; 3 — парозаборный зонд; 4 и 5 — подводящие трубы.

ская энергия. Для нормальной работы объема ввод пароводяной смеси в паровое пространство выполняют с малыми скоростями. С целью понижения скорости обычно устанавливают короба, большей частью разомкнутые внизу для слива циркулирующей воды.

Объемный сепаратор в качестве грубого разделителя работает и без дополнительных сепарационных устройств, поскольку повышенная влажность пара на входе сравнительно быстро снижается.

Для повышения эффективности работы основного сепарационного объема в зависимости от солевого содержания котловой воды применяют жалюзийные, массообменные либо центробежные сепараторы, включаемые в промежуток между объемами.

Особенности конструкций внутрибарабанных устройств заключаются в том, что несмотря на отсутствие больших перепадов давления необходимо иметь достаточно проч-

ной объем барабана осушать гребную сепарацию в отсеках либо небольших циклонах. Некипящие экономайзеры дают недогретую до температуры насыщения воду, поэтому необходимо предусматривать защиту стенок барабана от действия недогретой питательной воды.

Объемные сепараторы способны достаточно эффективно работать без дополнительных устройств.

Однако эффективность работы простейших объемных сепараторов в значительной степени зависит от расположения штуцеров ввода пароводяной смеси. При вводе ее ниже уровня воды более надежно гасится кинетиче-

ские и надежные соединения. Болтовые соединения съемных деталей в последнее время заменяют клиновыми. Это упрощает сборку и разборку устройств.

Кроме барабанов иногда применяют линейные объемные сепараторы, корпуса которых имеют форму, близкую к шаровой.

Рассмотрим конструкцию объемных сепараторов для котлов ШБ, разработанную и опробованную Промэнерго [Л. 27].

В барабан котла (рис. 3-10) пароводяная смесь подается на уровне его оси трубами большого диаметра. Скорость пароводяной смеси при входе в барабан составляет 10 м/сек, что в 9—10 раз превышает допустимые значения (табл. 3-1).

Промежуточный жалюзийный сепаратор 1 надежно гасит скорость ввода. В отсеке грубой сепарации происходит отделение основной массы циркулирующей воды. В основной объем пар входит с малой скоростью (табл. 3-1).

Пароприемный потолок сделан разборным, в виде короба, что уменьшило сварочные работы в барабане. Эти устройства эффективно работали при солевого содержания котловой воды до 1000 мг/кг. Так как все устройства полностью разборные, ремонтные работы можно проводить внутри барабанов без повреждения устройств.

Питательное устройство выполнено в виде погружен-

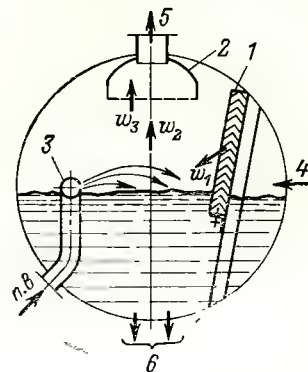


Рис. 3-10. Сепарационные устройства котлов ШБ.

1 — жалюзи; 2 — пароприемный потолок; 3 — поднятое струйное паропромывочное устройство; 4 — ввод пароводяной смеси; 5 — отбор пара; 6 — отвод воды.

Таблица 3-1

Скорости пара, м/сек

Наименование элементов сепарационных устройств	Давление, кгс/см ²		
	5	6	7
Зазоры жалюзи	1,4	1,2	1,0
Объем барабана	0,25	0,21	0,18
Отверстия потолка	7,7	7,2	6,2

ной трубы с отверстиями (водяной экономайзер некипящий).

Особенности конструктивного оформления объемных сепараторов заключаются в том, что работы внутри барабанов следует сводить до минимума, подгоняя сопрягаемые детали вне барабана. Удобно вести монтаж узлами, проходящими в лапы барабанов.

3-6. УСТРОЙСТВА, СПОСОБСТВУЮЩИЕ МАКСИМАЛЬНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПАРОВОГО ОБЪЕМА

Как видно из расчетов объемных сепараторов, важной характеристикой в их работе является подъемная скорость пара. Следовательно, основной задачей при проектировании таких сепарационных устройств является

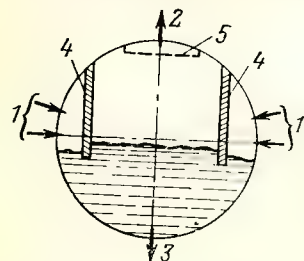


Рис. 3-11. Размещение жалюзи на обеих стенках барабана.

1 — ввод пароводяной смеси;
2 — отбор пара; 3 — отвод воды;
4 — жалюзи; 5 — пароприемный потолок.

распределение потока пара равномерно по максимально возможной площади парового объема и устранение местных потоков, возмущающих поле скоростей. С целью увеличения активной части площади зеркала испарения разработана надежная схема использования парового объема барабанов, с применением погруженных дырчатых листов и пароприемных потолков.

В ряде случаев применением вертикальных жалюзи удастся использовать двусторонний ввод пароводяной

смеси в барабан. Даже если скорость на выходе пара из жалюзи будет меньше расчетной подъемной, двусторонний ввод пара в сепарационно-активный объем целесообразен и желателен, а потому в некоторых котлах подводящие трубы вводят с двух сторон барабана (рис. 3-11).

Важным и обязательным условием нормальной работы сепарационного объема является ввод в него пара с выравненными по всему сечению малыми скоростями. Даже небольшие местные струи пара повышенной скорости способны заметно ухудшить общее качество пара, выдаваемое котлом. Эти ухудшения могут остаться не-

замеченными, если анализ качества пара проведен при неудачно расположенных точках отбора проб (см. рис. 3-9). В результате этого при несущественных ухудшениях общего качества пара возможен периодический занос отдельных змеевиков перегревателя. Следовательно, объемные сепараторы необходимо снабжать устройствами, обеспечивающими надежное снижение до средних значений повышенных местных скоростей пара. Недопустим ввод даже чистого пара (например, из выносных циклонов) в объем барабана без установки защитных устройств. Часто оказываются неработоспособными объемные сепараторы, особенно барабаны малого диаметра, в которых не защищен ввод в них пароводяной смеси. В этих случаях необходима установка дополнительных сепараторов (например, жалюзи) на отборе пара из барабана.

При котловой воде с высоким содержанием необходимо иметь предвключенные центробежные устройства для того, чтобы кроме основного их назначения — разделения пара и воды — надежно разрушать высокоустойчивую пену. Без предварительного пеногашения часть парового объема оказывается заполненной пеной, в результате чего уменьшается сепарационно-активный объем. В этих случаях приходится уменьшать нагрузку котла.

Известны примеры и другого рода: при организации схем ступенчатого испарения снижается содержание котловой воды I ступени испарения. Это позволяет повышать производительность ступени при сохранении высокого качества пара.

Для максимального использования паровых объемов барабанов нецелесообразно оставлять «паровые мешки» — пассивные участки, не используемые в процессе сепарации.

Глава четвертая ПЛЕНОЧНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

4-1. УСТРОЙСТВО ПЛЕНОЧНЫХ СЕПАРАТОРОВ

Пленочные сепараторы могут быть выполнены в виде перфорированных или щелевых потолков (рис. 4-1,а), угловых (рис. 4-1,б) и волнистых жалюзи (рис. 4-1,в),

лабиринтных (рис. 4-1,з), ударных (рис. 4-1,д) и комбинированных (рис. 4-1,е) конструкций.

Перфорированные или щелевые потолки, уголкового и волнистые жалюзи можно набирать в несколько рядов, что повышает эффективность их работы.

В промышленности широко применяют жалюзи в барабанах котла, схемы расположения которых показаны на

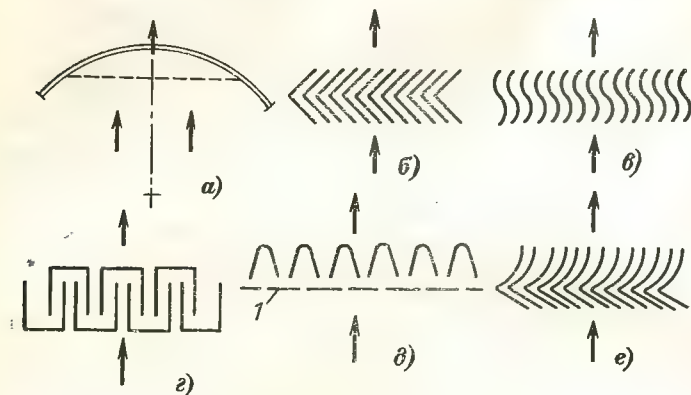


Рис. 4-1. Модификации пленочных сепараторов.

а — дроссельный (перфорированный); б, в — поворотные; г — лабиринтный; д — ударный; е — комбинированный.

рис. 4-2. Такими устройствами оборудовано большое количество котлов.

При применении жалюзи происходит:

гашение повышенной кинетической энергии местных потоков пароводяной смеси, выходящих из подводящих труб со скоростью 5—10 м/сек. Обладая небольшим гидравлическим сопротивлением, пленочные сепараторы тем не менее достаточно эффективно выравнивают поле скоростей по всему сепарационно-активному объему барабана;

так как вода хорошо смачивает стальные поверхности, частицы котловой воды, соприкасаясь с развитыми поверхностями элементов жалюзи, оседают на них и затем стекают. Срыв полученной таким образом пленки возможен лишь при высокой скорости пара;

наличие поворотов пара в жалюзи вызывает центробежные ускорения на поворотах малых радиусов, что

способствует интенсивному выделению влаги из потоков пара.

Недостатками жалюзи являются:

сравнительно большая металлоемкость этих устройств, причем тонкие стальные гофрированные листы с течением времени подвергаются коррозии и их приходится заменять;

возможность забивания жалюзи различными отложениями, что приводит к повышению их гидравлического сопротивления;

резкое снижение эффективности работы при содержании котловой воды выше 1000 мг/кг вследствие того, что из воды высокого содержания образуется устойчивая пена, которую эти сепараторы не могут быстро разрушить. Приходится ограничивать производительность котлов или применять барабаны увеличенного объема. Жалюзи устанавливают и над внутрибарабанными циклонами [Л. 28].

Часто для повышения эффективности работы пленочных сепараторов одновременно с жалюзийными сепараторами помещают перфорированный лист 1 (рис. 4-1,д), в отверстиях которого пар проходит с повышенной скоростью, в результате чего повышается перепад давления и улучшается выравнивание скоростей по фронту движения пара в объеме.

Создание больших перепадов в узких (шириной 2—3 мм) щелях нежелательно, поскольку они более подвержены забиванию по сравнению с круглыми отверстиями диаметром 10—15 мм.

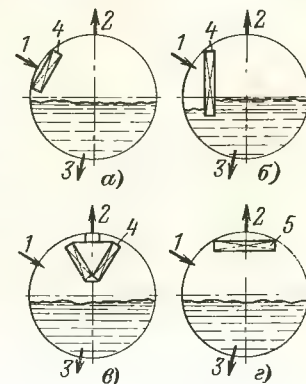


Рис. 4-2. Схемы расположения жалюзи в барабане котла.

а — входные; б — промежуточные; в — выходные; г — выходные горизонтальные; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды; 4 — жалюзи; 5 — жалюзийный потолок.

4-2. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ УСКОРЕНИЯ В ЖАЛЮЗИЙНЫХ СЕПАРАТОРАХ

При прохождении потоков пара по криволинейным каналам жалюзи возникают центробежные ускорения.

Величина этих ускорений может быть достаточно большой, чем в известной мере и определяется высокая эффективность работы таких сепараторов. Величина центробежных ускорений для ударных жалюзи (дроссельные стенки ОРГРЭС) (рис. 4-3) может быть определена по формуле

$$\alpha_{цб} = \frac{w_1^2}{r}, \quad (4-1)$$

где $\alpha_{цб}$ — центробежное ускорение, $м/сек^2$;

w_1 — скорость потока пара, $м/сек$;

r — радиус потока пара, $м$.

Для котлов среднего давления принимается скорость $w_1 = 8 м/сек$. При $r = 0,02 м$

$$\alpha_{цб} = \frac{8^2}{0,02} = 3200 м/сек^2$$

или в 300 раз больше земного ускорения. Далеко не в каждом собственно центробежном сепараторе развиваются такие высокие ускорения.

Влажный пар, пройдя через ряд отверстий перфорированного листа 1, попадает на лоток 2 (рис. 4-3), за-

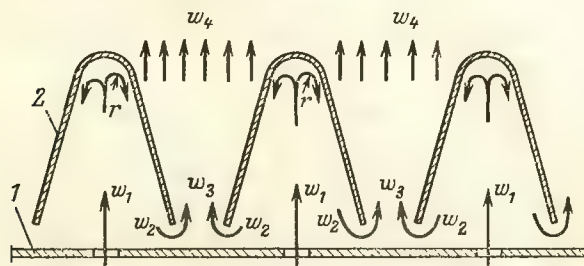


Рис. 4-3. Схема действия ударных жалюзи.

w_1 — скорость входа пара; w_2 — скорость выхода пара из жалюзи; w_3 и w_4 — скорости входа пара в основной объем; 1 — перфорированный лист; 2 — лоток.

тем поворачивает на 180° и выходит в паровой объем с малой скоростью ($w = 1 м/сек$). В этом устройстве удачно сочетаются высокие центробежные ускорения и малые выходные скорости. Гидравлическое сопротивление дроссельной стенки не превышает $100-150 кгс/м^2$.

Аналогично этому можно определить центробежные ускорения в других типах жалюзийных сепараторов. Все типы жалюзи создают центробежные ускорения.

Отмечается [Л. 26], что жалюзийные сепараторы с волнистыми пластинами более эффективны, чем уголки. По-видимому при резких изгибах пластин легче срываются капли уже отсепарированной воды.

Существенным положительным свойством жалюзийных сепараторов является малая толщина слоя сепарируемого пара, составляющая 5—10 мм. Чем меньше толщина слоя, движущегося по криволинейным траекториям, тем легче вывести из потока витающую в нем каплю воды.

По аналогии с [Л. 29], где рассматривается движение пылинок в криволинейных каналах, можно определить влияние толщины слоя сепарируемого в жалюзи пара на эффективность сепарации (рис. 4-4).

Приравняв силы центробежного ускорения и сопротивление среды при радиальном движении частицы, составим применительно к пару и воде дифференциальное уравнение, проинтегрировав которое и произведя некоторые преобразования, получим:

$$S = R_2 - R_1 = R_2 (1 - e^{k \omega r^2 (\varphi_1 - \varphi_2)}), \quad (4-2)$$

где S — ширина щели, $м$;

R_1, R_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы кривизны канала, $м$;

e — основание натуральных логарифмов;

k — коэффициент, учитывающий параметры пара и воды, определяемый по формуле

$$k = \frac{9}{2} \frac{\rho' - \rho''}{\rho'' v''}; \quad (4-3)$$

здесь ρ'', ρ' — соответственно плотность пара и воды, $кг/м^3$;

v'' — кинематическая вязкость пара, $м^2/сек$;

r — радиус капли, $м$;

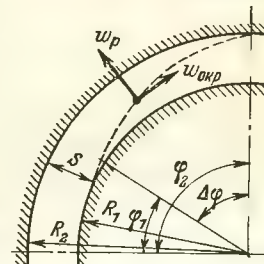


Рис. 4-4. Схема движения капли в криволинейном канале.

φ_1 , φ_2 — соответственно начальный и конечный углы;

ω — угловая скорость потока, $1/\text{сек}$.

Анализ уравнения (4-2) показывает, что:

с уменьшением ширины канала $S=R_2-R_1$ уменьшается угол $\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2$, на котором частица данных размеров будет выведена из потока;

уменьшение радиуса кривизны обуславливает соответственное уменьшение ширины канала. Соотношение

$$\frac{S}{R_2} = 1 - e^{k\omega r^2 \Delta\varphi} \quad (4-4)$$

является важным фактором, определяющим эффективность работы жалюзийных сепараторов;

эффективность жалюзийных сепараторов зависит от параметров пара. С увеличением давления $k \rightarrow 0$, поскольку $\rho' - \rho'' \rightarrow 0$, следовательно, $\frac{S}{R_2} \rightarrow 0$, т. е. для бо-

лее высокого давления требуется соответственно повышать эффективность работы сепараторов.

Большая поверхность пластин жалюзийных сепараторов, исчисляемая квадратными метрами для каждого котла, также способствует эффективной работе жалюзийных сепараторов.

Движение пара по криволинейным каналам обуславливает появление центробежных сил, способствующих выпадению частиц влаги из потока пара. Чем меньше ширина щели, тем легче отсепарировать частицу. Однако по условиям надежности работы котла нельзя уменьшать ширину каналов менее 3—5 мм, поскольку возможно забивание их отложениями. Важным конструктивным показателем является отношение ширины щели к радиусу закругления.

4-3. ВЛИЯНИЕ ЖАЛЮЗИ НА РАБОТУ ОБЪЕМНЫХ СЕПАРАТОРОВ

На эффективность работы объемных сепараторов резко отрицательное действие оказывает повышенная скорость потоков пара.

Наладка эффективной работы паровых объемов в значительной степени зависит от того, насколько удается выравнивать скорости потоков на входе пара в объем.

Жалюзийные сепараторы, обладая определенным гидравлическим сопротивлением, эффективно выравнивают скорость пара (рис. 4-5).

Применительно к процессам сепарации представляется возможным вывести суммарный коэффициент по-

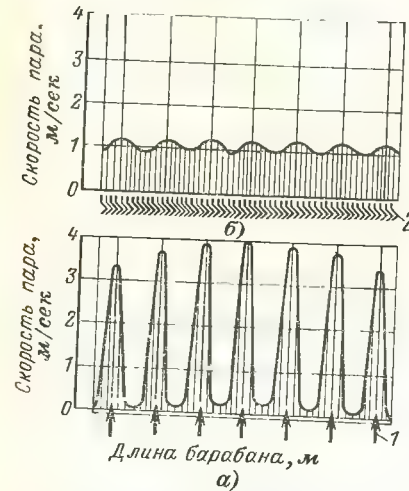


Рис. 4-5. Поля скоростей пара в барабане.

а — без жалюзи; б — на выходе из жалюзи; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — жалюзи.

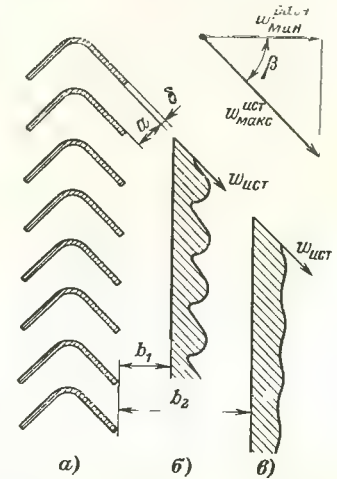


Рис. 4-6. Поля скоростей на выходе из жалюзи.

а — жалюзи; б — поле скоростей вблизи жалюзи; в — то же на большом расстоянии от жалюзи.

лезного действия жалюзи, показывающий отношение средней расчетной скорости пара к максимальной скорости пара, получаемой на выходе из жалюзи (рис. 4-5 и 4-6)

$$\sum \eta_{\text{жал}} = \frac{w_{\text{расч}}}{w_{\text{макс}}} \quad (4-5)$$

Этот суммарный к. п. д. можно выразить в следующем виде:

$$\sum \eta_{\text{жал}} = \eta_{\beta} \eta_{\delta} \eta_{\omega} \eta_{\kappa}, \quad (4-6)$$

где η_{β} — коэффициент угла наклона потока пара;

η_{δ} — коэффициент заполнения сечения;

η_{ω} — коэффициент выравнивания скоростей;

η_{κ} — конструктивный коэффициент.

Коэффициент угла наклона потока пара на выходе из жалюзи определяется по формуле

$$\eta_{\beta} = \frac{w_{\text{норм}}}{w_{\text{ист}}} = \cos \beta, \quad (4-7)$$

откуда видно, что чем больше угол наклона выходной части жалюзи, тем выше скорость пара.

Коэффициент заполнения сечения показывает отношение площади полезного проходного сечения к общему сечению и определяется по формуле

$$\eta_{\delta} = \frac{a}{a + \delta}, \quad (4-8)$$

и чем тоньше пластинки и больше расстояние между ними, тем выше этот коэффициент. С другой стороны, чем меньше расстояние a между элементами сепаратора, тем меньше расстояние b , на котором скорости в достаточной степени выравниваются (рис. 4-6).

Третий множитель в уравнении (4-6) показывает величину неравномерности скорости пара на выходе из жалюзи, вызываемую наличием резко выраженных местных потоков перед жалюзи. Чем выше сопротивление жалюзи и чем меньше сопротивление коробов, тем более надежно будет выравниваться скорость потока пара на выходе из жалюзи:

$$\eta_w = \frac{w'_{\text{ср}}}{w'_{\text{макс}}}. \quad (4-9)$$

Для повышения этого коэффициента нужно соблюдать неравенство

$$w_{\text{кор}}^{\text{акс}} \ll w_{\text{жал}}. \quad (4-10)$$

где $w_{\text{кор}}^{\text{акс}}$ — аксиальная скорость пара в коробе, м/сек;

$w_{\text{жал}}$ — скорость пара в жалюзи, м/сек.

Четвертый множитель — конструктивный коэффициент зависит от качества изготовления и типа выбранных сепараторов. Неодинаковые зазоры могут обусловить различные результирующие скорости входа пара в активный паровой объем:

$$\eta_k \approx \frac{a_1}{a_2}, \quad (4-11)$$

где a_1, a_2 — соответственно меньший и больший зазоры.

Рассмотрение суммарного к. п. д. жалюзи показывает, что для получения высокоэффективных сепарационных устройств необходимо разрабатывать или выбирать жалюзи, обладающие высокой сепарирующей способностью и способные наилучшим образом организовать работу сепарационного объема барабана.

Подсчитаем суммарный к. п. д. для разновидностей жалюзи, показанных на рис. 4-1. Полученные данные расчета приведены в табл. 4-1.

Таблица 4-1
Суммарный к. п. д. жалюзи

Типы пленочных сепараторов	η_{β}	η_{δ}	η_w	η_k	$\Sigma \eta_{\text{жал}}$
Перфорированный лист	1	0,05	0,9	1	0,045
Угловые жалюзи	0,71	0,9	0,9	0,9	0,5
Волнистые жалюзи	0,86	0,9	0,9	0,9	0,62
Лабиринтные устройства	1	0,3	0,9	0,9	0,25
Ударные жалюзи	1	0,6	0,9	0,9	0,5
Комбинированные жалюзи	0,95	0,9	0,9	0,9	0,7

Примечание. Конструктивный к. п. д. условно принят равным 0,9 для жалюзи всех типов.

Как видно из табл. 4-1, комбинированные жалюзи имеют наиболее высокий суммарный к. п. д.

Если объем барабана за жалюзи не используется как сепарационный, то величина к. п. д. $\Sigma \eta_{\text{жал}}$ не имеет существенного значения. Этим объясняется тот факт, что перфорированные листы применяют в основном как пароприемные потолки.

Для того чтобы скорость пара на выходе из жалюзи была наименьшей и приближалась к теоретической расчетной, требуется, чтобы суммарный к. п. д. жалюзи $\Sigma \eta_{\text{жал}}$ был максимальным. Очевидно также, что общая площадь жалюзи должна выбираться по возможности большей.

4-4. РАСЧЕТ ЖАЛЮЗИЙНЫХ СЕПАРАТОРОВ

Наибольшее распространение получили схемы включения жалюзи в качестве промежуточных сепараторов (рис. 4-2, б).

Расчет жалюзийных сепараторов состоит из:

а) гидравлического расчета — для определения сопротивления устройств с целью учета возмож-

ного влияния этого сопротивления на гидравлический режим работы котла (перепад уровней по отсекам, влияние на циркуляцию);

б) расчета скоростей пара на выходе из жалюзи — для оценки эффективности сепарации в объеме барабана;

в) расчета центробежных ускорений в жалюзи — для ориентировочной оценки сепарирующей способности собственно жалюзи.

Гидравлический расчет. Сопротивление жалюзи при проходе через них пара ведется по формуле

$$\Delta p_{\text{жал}} = \rho'' \xi_{\text{жал}} \frac{w_{\text{пр}}'^2}{2}; \quad (4-12)$$

здесь ρ'' — плотность влажного пара на входе в жалюзи, кг/м^3 ;

$\xi_{\text{жал}}$ — коэффициент сопротивления, который подсчитывается в зависимости от конфигурации проточной части;

$w_{\text{пр}}''$ — скорость пара, м/сек , определяемая по формуле

$$w_{\text{пр}}'' = \frac{V_{\text{сек}}''}{\Sigma F_{\text{пр}}}, \quad \text{м/сек}, \quad (4-13)$$

где $\Sigma F_{\text{пр}}$ — суммарное проходное сечение жалюзей, м^2 .

Скорость воды в водоперепускном окне определяется по формуле

$$w_{\text{вп}}' = \frac{D_{\text{к}} k_{\text{ц}}}{3600 F'}, \quad \text{м/сек}, \quad (4-14)$$

где $D_{\text{к}}$ — производительность котла, кг/ч ;

$k_{\text{ц}}$ — кратность циркуляции;

F' — площадь водоперепускного сечения, м^2 .

Сопротивление водоперепускного сечения определяется по формуле

$$\Delta p'_{\text{вп}} = \rho' \xi_{\text{вп}} \frac{w_{\text{вп}}'^2}{2}. \quad (4-15)$$

Разность уровней воды в жалюзийном отсеке и в остальном объеме барабана составит:

$$\Delta H_{\text{жал}} = \frac{\Delta p'_{\text{вп}} - \Delta p''_{\text{жал}}}{g(\rho' - \rho'')}, \quad \text{м}. \quad (4-16)$$

При проведении этого расчета следует учитывать, что часть жалюзи может быть забита отложениями (при попадании на них питательной воды). В этом случае

сопротивление жалюзи возрастает до величины, которую способен создать гидрозатвор разомкнутого короба.

Второй особенностью при промежуточном включении жалюзи является раскачка уровня воды в основном объеме барабана из-за пульсации уровня воды в жалюзийном отсеке:

$$\Delta H_{\text{бар}} = \Delta H_{\text{жал}} \frac{F_{\text{жал}}}{F_{\text{бар}}}, \quad \text{м}, \quad (4-17)$$

где $\Delta H_{\text{бар}}$ и $\Delta H_{\text{жал}}$ — соответственно колебание уровня воды в барабане и жалюзийном отсеке, мм ; $F_{\text{бар}}$ и $F_{\text{жал}}$ — соответственно площадь зеркала испарения барабана и жалюзийного отсека, м^2 .

Если пульсация уровня воды в жалюзийном отсеке будет составлять 100—200 мм , то это может отразиться на положении основного уровня воды в барабане. Возможны явления резонансного характера.

Если жалюзи имеют несколько ходов при различной скорости пара на отдельных участках, то нужно провести расчет по каждому отдельному участку.

Площадь проходного сечения подсчитывается обычным способом, с учетом возможных колебаний уровня воды в барабане.

Расчет скоростей пара на выходе из жалюзи. Для улучшения работы парового объема требуется иметь минимальные скорости пара на выходе из жалюзи, что следует из выражения (4-5).

Расчетная скорость на выходе пара из жалюзи определяется по формуле

$$w_{\text{мин}}^{\text{расч}} = \frac{V_{\text{сек}}''}{AB}, \quad \text{м/сек}, \quad (4-18)$$

где A и B — соответственно габаритные длина и ширина жалюзи, м .

Для уменьшения $w_{\text{мин}}^{\text{расч}}$ требуется увеличивать площадь сечения жалюзи.

Для того чтобы суммарный к. п. д. жалюзи, определяемый по (4-5), был примерно равен единице, требуется, чтобы пар выходил из жалюзи нормально к фронту, а жалюзи были выполнены из тонкостенного материала.

Этот расчет применим лишь для тех жалюзийных сепараторов, пар из которых попадает в сепарационно-активный объем. Для сепараторов, включенных на выходе пара из барабана, $\Sigma \xi_{\text{жал}}$ не подсчитывается ввиду

того, что сепарацией в небольшом пространстве за жалюзи обычно можно пренебрегать.

Расчет центробежных ускорений в жалюзи. Центробежные ускорения при движении частиц пара в криволинейных каналах подсчитываются по формуле

$$a_{\text{жал}} = \frac{\omega_{\text{жал}}^2}{R}, \quad (4-19)$$

где R — радиус кривизны потока, m .

Определяется также скорость срыва пленки. Для лучшей сепарации желательно, чтобы расчетные значения $\omega_{\text{жал}}$ были ниже предельно допустимых скоростей пара по условиям срыва пленки.

Как показывают данные теплотехнических испытаний, сепарирующие свойства собственно жалюзийных сепараторов существенно влияют на эффективность работы устройств в целом, однако более важным оказывается влияние скорости выхода пара из жалюзи на эффективность работы основного сепарационного объема.

Как видно из приведенных материалов, жалюзийные сепараторы требуют детальных расчетов. Правильно рассчитанные и нормально эксплуатируемые жалюзийные сепараторы обеспечивают высокую эффективность работы установленных сепарационных устройств.

Глава пятая

МАССООБМЕННЫЕ СЕПАРАТОРЫ

5.1. УСТРОЙСТВО МАССООБМЕННЫХ СЕПАРАТОРОВ

Применяются следующие четыре вида массообменных сепараторов.

1. **Объемные**, когда питательная вода подается в корыта 1 трубами 2 чаще всего через боковую стенку (рис. 5-1). Сверху корыта открыты и вода выливается из них в толщу котловой воды — погруженные устройства (рис. 5-1,а), либо в паровое пространство — поднятые устройства (рис. 5-1,б).

2. **Струйные**, из которых питательная вода поступает многочисленными струйками и отдельными каплями в водяной объем — погруженные (рис. 5-2,а), либо в паровой объем — поднятые (рис. 5-2,б).

3. **Барботажные**, представляющие собой лотки с перфорированными днищами, на которых находится слой питательной воды (рис. 5-3). Пузырьки пара барботируют через слой относительно чистой воды. На зеркале испарения из этой воды образуются пленки паро-

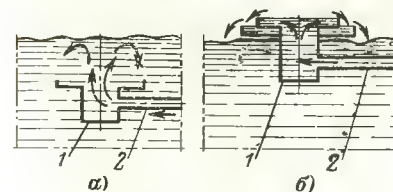


Рис. 5-1. Объемные массообменные сепараторы.
а — погруженные; б — поднятые;
1 — питательное корыто; 2 — ввод питательной воды.

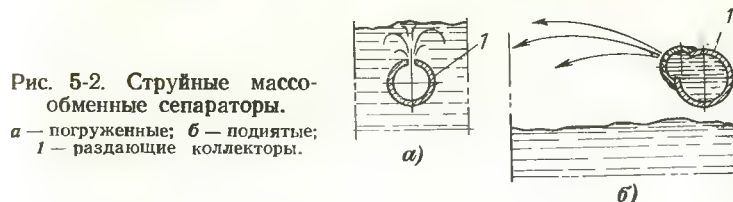


Рис. 5-2. Струйные массообменные сепараторы.
а — погруженные; б — поднятые;
1 — раздающие коллекторы.

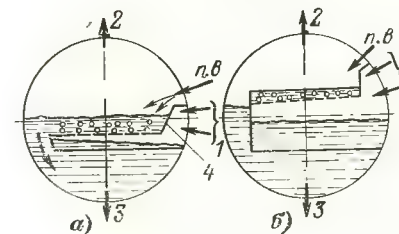


Рис. 5-3. Барботажные массообменные сепараторы.
а — погруженные; б — поднятые.
2 — ввод пароводяной смеси; 3 — отвод пара; 4 — отвод воды;
л. в. — ввод питательной воды.

вых пузырьков, при разрушении которых получается большое количество мелких капелек, выполняющих важную роль в процессе массообмена. Эти сепараторы также выполняются как погруженными, так и поднятыми в паровое пространство.

4. **Центробежные**, в которых питательная вода подается перед циклонами, внутрь циклонов либо сверху на циклоны. Этот вид сепараторов может быть выполнен в большом числе вариантов благодаря многообразию схем включения циклонов; их применяют лишь в виде поднятой конструкции¹.

¹ Центробежные паропромысловые устройства рассматриваются в § 6-4.

Эффективность поднятых устройств, как правило, выше, чем погруженных, поскольку питательная вода в них не сразу смешивается с котловой водой.

Все разновидности массообменных устройств, показанные на рис. 5-1—5-3, рассчитаны на некипящие водяные экономайзеры. Для котлов с кипящими водяными экономайзерами следует предусматривать устройства для гашения скорости пароводяных струй на выходе из подводящих труб.

5-2. ОБЪЕМНЫЕ МАССООБМЕННЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Погруженные и поднятые питательные корыта различной конфигурации применяют очень давно. Из погруженного корыта питательная вода подается в толщу котловой воды. Поэтому в этих устройствах явление массообмена проявляется сравнительно слабо и применение их почти не влияет на качество вырабатываемого пара.

Погруженные массообменные сепараторы (рис. 5-1,а) применяются редко, поскольку при кипящих экономайзерах они малоэффективны, а при недогретой питательной воде возможен слив концентрированных струй холодной воды на стенку барабана.

В поднятом объемном сепараторе (рис. 5-1,б) питательная вода растекается по большой площади и надежно прогревается паром. Вследствие хорошего контакта чистой питательной воды с паром на зеркале испарения разрушается пена и происходит массообмен между паром и питательной водой.

К недостаткам объемных массообменных устройств для котлов с некипящими водяными экономайзерами можно отнести часто встречающееся чрезмерное охлаждение отдельных участков стенок барабанов мощными струями не догретой до температуры насыщения питательной воды. Если погруженные корыта применяют для котлов с кипящим водяным экономайзером, то прорыв сквозь толщу котловой воды крупных паровых пузырей может вызывать ухудшение качества пара.

Для ориентировочной оценки траектории потоков питательной воды в водяном объеме барабана было проведено моделирование этого процесса, которое показало,

что корыта являются малонадежным приспособлением для организованного и равномерного распределения питательной воды. Для улучшения их эффективности в некоторых корытах верхнюю кромку выполняют зубчатой либо недалеко от верхней кромки сверлят ряд отверстий, через которые вода стекает отдельными струйками. Однако все эти приспособления в большинстве случаев оказываются малоэффективными, так как безнапорная подача питательной воды имеет существенные недостатки, в результате чего в современных котлах такие устройства не применяют.

Для улучшения работы котлов ранее установленные в них корыта заменяют более совершенными устройствами. Такие переделки целесообразно проводить не только для улучшения работы котлов, но и для уменьшения громоздкости внутриварованных устройств.

5-3. СТРУЙНЫЕ МАССООБМЕННЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Струйные массообменные сепараторы получили очень широкое распространение в барабанных котлах среднего и низкого давления.

Погруженное струйное устройство (рис. 5-2,а) подает питательную воду к зеркалу испарения, в результате чего пена в этом месте разрушается, а пар, проходя над зеркалом испарения с более чистой водой, отдает ей часть своих примесей.

Конструкция погруженных струйных сепараторов весьма проста — труба с заглушенным торцом и рядом отверстий в стенке. Такое устройство обеспечивает вполне надежное перемешивание тонких струек питательной воды с основной массой котловой воды, вследствие чего достигается хороший подогрев относительно холодной питательной воды, что хорошо защищает стенки барабана от термических напряжений даже при сильном недогреве питательной воды.

Устройства этого типа хорошо зарекомендовали себя в серийных котлах типа ДКВ — ДКВР при самых разнообразных условиях воднохимического режима.

Поднятые струйные устройства (рис. 5-2,б) обладают значительно большей эффективностью, способствуя разрушению пены на поверхности котловой воды. Струйки воды интенсивно подогреваются в полете вслед-

ствие высоких значений коэффициента теплопередачи от насыщенного пара к воде. Одновременно происходит промывка пара.

В случае значительного недогрева питательной воды стенки барабана приходится защищать от попадания на них струек питательной воды.

Солесодержание питательной воды при погруженных струйных устройствах не ограничивают, так как питательная вода всегда чище котловой, а при поднятых струйных сепараторах предельно допустимое солесодержание питательной воды составляет 1 000—2 000 мг/кг. При более высоком значении солесодержания питательной воды поднятые струйные устройства становятся малоэффективными как в отношении разрушения пены, так и промывки пара.

В эксплуатации иногда встречаются явления (более часто при ручном питании), когда одновременно с быстрым повышением уровня воды в барабане снижается влажность пара, а с понижением уровня качество пара ухудшается. Это объясняется тем, что единовременная подача большого количества питательной воды уменьшает концентрацию солей в котловой воде у зеркала испарения, разрушает слой пены в этом месте, что и оказывается более существенным для процесса сепарации, чем ухудшение, связанное с повышением уровня. Обычно это наблюдается при недостаточной продувке котла.

Гидравлический расчет струйных устройств заключается в следующем.

1. Определяют секундный расход питательной воды с учетом неравномерной работы автомата питания (обычно 150% максимальной производительности котла).

2. Выбирают скорость воды в отверстиях в пределах 1—2 м/сек.

3. Определяют суммарную площадь сечения отверстий, по которой и подбирается число и диаметр отверстий. Рекомендуется диаметр отверстий принимать равным 12—16 мм.

4. Площадь поперечного сечения раздающего коллектора принимают примерно вдвое больше сечения раздающих отверстий. Это делается для того, чтобы получить более равномерную раздачу воды по отдельным отверстиям.

Расчет собственно сепарационной эффективности струйных сепараторов не разработан. При конструировании следует добиваться минимальной громоздкости устройств. Стенки барабана в местах возможного попадания на них питательной воды защищают сплошными листами тонкостенного железа или сепарационными устройствами, например жалюзи.

Распределительный коллектор устанавливают один на весь барабан. Не рекомендуется применять несколько коротких коллекторов, поскольку при забивании отверстий в одном из них возможно выключение из работы соответствующей части экономайзера.

Для компенсации термических смещений коллектора большой длины устанавливают достаточно длинные подводящие трубы. Возможно также применение линзовых, либо сальниковых компенсаторов.

5-4 БАРБОТАЖНЫЕ МАССООБМЕННЫЕ СЕПАРАТОРЫ

Барботажные массообменные сепараторы погруженные и поднятые получили широкое распространение в энергетических котлах среднего и высокого давления, в промышленной же энергетике применение их ограничено. Причинами этого являются сравнительно малая их эффективность при работе на котловой воде высокого солесодержания и пониженная эффективность — при питательной воде с солесодержанием выше 200—300 мг/кг. Кроме того, громоздкость этих устройств затрудняет рациональное их выполнение в котлах с барабанами малого диаметра.

Погруженное барботажное устройство (рис. 5-3,а) состоит из разомкнутого снизу короба, под который подается пароводяная смесь. Крышка короба выполнена перфорированной. Питательная вода подается сверху. Пар барботирует сквозь слой воды.

В данном случае имеется ряд положительных явлений — гашение кинетической энергии струй пара, распределение потока пара по большой поверхности, уменьшение скорости ввода пара в паровой объем. Массообмен здесь происходит не очень интенсивно, поскольку солесодержание воды над погруженным листом лишь немногим меньше, чем под ним, так как вместе с барботирующим паром на лист попадает большое количество котловой воды.

Это устройство широко применяется в 1-й ступени испарения котлов, оборудованных ступенчатым испарением. При невысоком солесодержании питательной и котловой воды это устройство обладает высокой эффективностью. Однако недостатком его является затруднительность достижения большой разницы солесодержания воды над щитом и под ним.

Поднятое барботажное устройство (рис. 4-3,б) обладает значительно более высокой эффективностью работы. Минимальная толщина слоя питательной воды составляет 40 мм [Л. 4]. Основное преимущество его по сравнению с погруженным — меньшее разбавление слоя питательной воды котловой водой. Область применения этих устройств ограничивается из-за их громоздкости, а также степени солесодержания питательной воды. Если принять влажность пара 0,5%, то максимальный плотный остаток промывочной воды будет составлять менее 200 мг/кг. Повышенная громоздкость барботажных устройств затрудняет одновременное применение других типов сепараторов, например внутрибарабанных циклонов в барабанах малого диаметра.

Гидравлический расчет барботажных сепараторов заключается в определении суммарной площади проходного сечения перфорированных листов для пропуска всего пара при выбранной скорости. В поднятых устройствах определяется минимально допустимая высота подъема листа над уровнем воды в барабане. Рекомендуемые значения скорости пара в отверстиях щитов согласно [Л. 30] для котлов низкого и среднего давления составляют 3—4 м/сек. Минимально допустимая скорость составляет 30% максимальной. Из этого следует, что массообменные барботажные устройства сохраняют достаточную эффективность при нагрузках 30—50% номинальных значений.

В соответствии с размерами барабана выбирают площадь барботажного листа, расстояние между отверстиями и подсчитывают число отверстий в листе:

$$n = \frac{AB}{ab}, \quad (5-1)$$

где A и B — соответственно длина и ширина листа, м; a и b — соответственно расстояние между отверстиями по длине и ширине листа, м.

Зная производительность котла и давление пара в барабане, подсчитывают секундный объем пара по

формуле (3-8), после чего определяют проходное сечение всех отверстий; по числу отверстий определяют их диаметр.

Несколько более сложен подсчет минимальной высоты подъема промывочного щита над уровнем воды в барабане.

Высоту подъема уровня воды h в дренажной системе поднятого массообменного сепаратора определяют по формуле

$$h = \Delta h + \frac{\Sigma \Delta p}{g(\rho' - \rho'')}, \quad (5-2)$$

где Δh — максимальное повышение уровня воды в барабане, м; ρ' , ρ'' — соответственно плотность воды и пара, кг/м³; $\Sigma \Delta p$ — суммарный перепад давления, н/м², определяемый из выражения $\Sigma \Delta p = \Delta p_b + \Delta p_{ст} + \Delta p_{др}$; Δp_b — сопротивление барботажного устройства, н/м²; $\Delta p_{ст}$ — сопротивление слоя воды, н/м²; $\Delta p_{др}$ — сопротивление водоотводящей системы, н/м².

Высоту подъема паропромывочного листа над средним уровнем воды в барабане принимают больше расчетной величины для предотвращения попадания котловой воды на перфорированный лист

$$H = kh, \quad (5-3)$$

где H — высота подъема листа над уровнем воды, м; $k = 2 \div 4$ — коэффициент запаса.

При погруженных устройствах на перфорированный лист подается вся питательная вода, при поднятых — около половины ее расхода.

Высоту парового объема над массообменным устройством не рассчитывают. Эмпирически установлено, что ее минимальные значения составляют примерно 150—200 мм.

Глава шестая

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ СЕПАРАТОРЫ

6-1. РАДИАЛЬНЫЕ ЦИКЛОНЫ

Радиальные циклоны (рис. 6-1,а и 8-8,Р) имеют следующие основные преимущества перед циклонами других типов:

а) отсутствует зависимость эффективности работы от высоты корпуса, так что при ограниченном объеме барабана можно изготавливать компактные циклоны;

б) имеют повышенную эффективность работы благодаря высоким центробежным ускорениям.

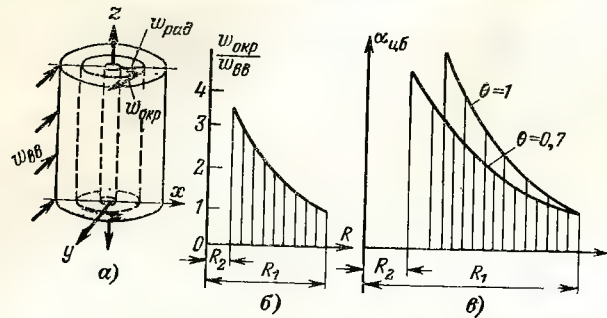


Рис. 6-1. Радиальный циклон.

а — схема циклона; б — график зависимости относительных окружных скоростей от радиуса циклона; в — график зависимости центробежных ускорений от радиуса циклона без учета трения ($\theta=1$) и с учетом трения ($\theta=0,7$).

Для уяснения особенностей работы радиальных циклонов рассмотрим движение в них идеальной жидкости, для чего выделим в объеме циклона тонкий цилиндр (рис. 6-1,а). Пар, заключенный в этом цилиндре, имеет относительно оси z некоторый кинетический момент L_z , определяемый по формуле

$$L_z = J_z \omega = m R \omega_{\text{окр}}, \quad (6-1)$$

где ω — угловая скорость пара в рассматриваемом цилиндре, $1/\text{сек}$; $J_z = m R^2$ — момент инерции полого цилиндра, $\text{кгс} \cdot \text{сек}^2$; $\omega_{\text{окр}}$ — окружная скорость, $\text{м}/\text{сек}$.

При отсутствии сил трения кинетический момент постоянен

$$L_z = \text{const.}$$

Приравнивая кинетические моменты для одной и той же массы частиц пара при перемещении ее в радиальном направлении от периферии к оси, получаем:

$$m R_1 \omega_{1\text{окр}} = m R_2 \omega_{2\text{окр}}, \quad (6-2)$$

откуда

$$\frac{\omega_{2\text{окр}}}{\omega_{1\text{окр}}} = \frac{R_1}{R_2},$$

т. е. с уменьшением радиуса вращения окружная скорость движения частиц возрастает по закону гиперболы.

При $R_2 \rightarrow 0$, $\omega_{2\text{окр}} \rightarrow \infty$.

На графике (рис. 6-1,б) изображена зависимость относительной окружной скорости частиц от радиуса циклона, из которой видно, что при перемещении вращающегося пара от периферии к центру его окружная скорость возрастает.

Для учета сил трения в формулу (6-2) вводим показатель степени θ , меньший единицы, так что эта формула приобретает вид

$$\omega_{2\text{окр}} = \omega_{1\text{окр}} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^\theta, \quad (6-3)$$

где $\theta < 1$.

Моделирование подтверждает, что в соответствии с формулой (6-3) при одновременном вращении и перемещении потока воды к центру окружная скорость возрастает.

При известном поле скоростей в радиальном циклоне центробежные ускорения будут составлять:

$$\alpha_2 = \frac{\omega_{1\text{окр}}^2}{R_2} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2\theta}. \quad (6-4)$$

На графике зависимости центробежных ускорений от радиуса вращения (рис. 6-1,в) видно, что силы трения уменьшают центробежные ускорения, развиваемые в радиальном циклоне. Тем не менее ускорения в этих циклонах достигают большой величины.

Потеря давления в радиальных циклонах при перемещении от периферии к центру (сопротивление корпусов) по аналогии с подсчетами, производившимися для циклонов, применяемых в устройствах газоочистки и др., составит:

$$\Delta p_{1-2} = \rho' \xi_{\text{корп}} \frac{w_1^2}{2}, \quad (6-5)$$

где $\xi_{\text{корп}} = 4\theta \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2\theta} - 1 \right]$.

Коэффициент сопротивления корпуса радиального циклона зависит от соотношения радиусов.

Так как каждая конструкция циклона имеет неизменное соотношение внешнего и внутреннего радиусов, то можно считать, что $\xi_{\text{корп}} = \text{const.}$ Тогда зависимость

сопротивления корпуса циклона от производительности котла будет выражаться формулой (6-5), т. е. сопротивление корпуса радиального циклона находится в квадратичной зависимости от его производительности.

Подсчет величины объемной нагрузки парового пространства радиальных циклонов показывает, что она может быть значительно выше, чем у объемных сепараторов.

Секундный объем пара, проходящего через циклон,

$$V''_{\text{сек}} = \omega_{\text{рад}} 2\pi RL, \quad (6-6)$$

где $V''_{\text{сек}}$ — секундный объем пара, $\text{м}^3/\text{сек}$; $\omega_{\text{рад}}$ — радиальная скорость пара в циклоне, $\text{м}/\text{сек}$; R и L — соответственно радиус и длина циклона, м .

Боковая поверхность циклона довольно значительна, а радиальная скорость при наличии высоких центробежных ускорений может во много раз превышать максимально допустимую подъемную скорость в объемных сепараторах.

По ряду соображений не представляется возможным полностью использовать теоретически возможную пропускную способность радиального циклона, но объемную нагрузку удачно выполненных радиальных циклонов можно повысить в десятки раз по сравнению с объемными сепараторами.

Ниже показано, что массовая нагрузка паровых объемов радиальных циклонов для котлов ДКВР-10/13 составляет $200\text{—}260 \text{ т}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ при $8\text{—}10 \text{ т}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ у объемных сепараторов.

Максимальное ускорение у этих циклонов доведено до $100\,000 \text{ м}/\text{сек}^2$, чем и объясняется высокая эффективность их работы.

Следовательно, радиальные циклоны можно применять в тех случаях, когда представляется возможность использовать большой перепад давления (например, при включении циклонов на выходе пара из барабана).

6-2. РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫЕ ЦИКЛОНЫ

Радиально-осевые циклоны получили наибольшее распространение в отечественной энергетике как при расположении их внутри, так и вне барабана. Широкому их распространению способствовала высокая эффективность работы и приемлемые значения сопротивления.

В настоящее время практически все энергетические котлы в СССР оборудуют циклонами этого типа.

В радиально-осевых циклонах пароводяная смесь вводится по касательной к образующей — так же как и в радиальных циклонах, а пар отбирается — как в осевых (рис. 6-2).

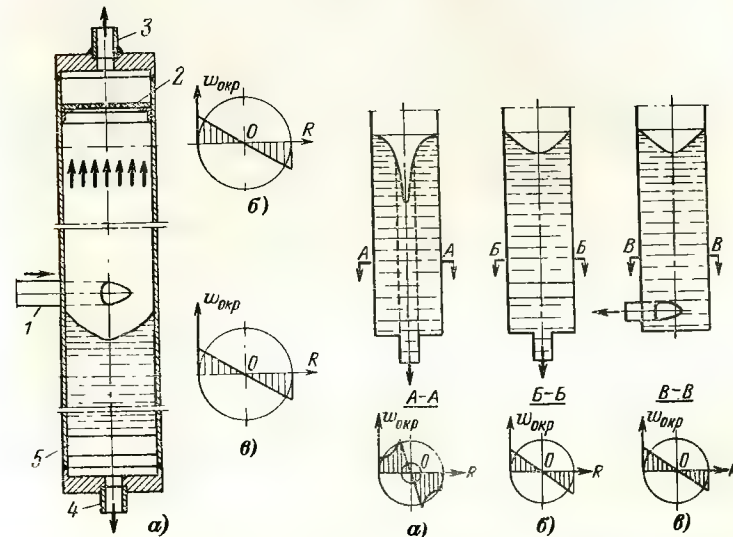


Рис. 6-2. Радиально-осевой циклон.

а — схема; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — пароприемный потолок; 3 — паровыводящий штуцер; 4 — водовыводящий штуцер; 5 — защитная планка; б — поле окружных скоростей пара; в — поле окружных скоростей воды.

Рис. 6-3. Схемы отвода воды из циклонов.

а — донный отвод без защитных устройств; б — донный отвод с защитной планкой; в — боковой отвод. Внизу — поля окружных скоростей воды в сечениях А-А, Б-Б и В-В.

Радиально-осевые циклоны располагают вертикально; в них поддерживается определенный уровень воды, оказывающий большое влияние на внутрициклонные процессы и определяемый уровнем воды в барабане, а также сопротивлением паро- и водоперепусков.

Ниже рассмотрены процессы, протекающие в паровом и водяном объемах циклонов, а также на границе раздела воды и пара в них.

Процессы в паровом объеме циклона. В паровом объеме происходит разрушение пены и сепарация капе-

лек влаги. Поля скоростей, а следовательно, и процессы в паровом объеме циклона в большой степени зависят от расположения пароводводящих штуцеров.

Основное количество радиально-осевых циклонов имеет на отборе пара пароприемный потолок 2 (рис. 6-2,а), выравнивающий подъемную скорость по всему поперечному сечению.

Приняв подъемную скорость пара одинаковой по всему сечению циклона, рассмотрим поле скоростей и ускорений в различных точках парового объема.

В связи с отсутствием организованного перемещения потоков пара от периферии к центру угловую скорость вращения пара можно принять одинаковой по всему сечению, а окружная скорость $\omega_{\text{окр}}$ будет наибольшей у стенок (рис. 6-2,б).

Частицы пара у оси будут иметь наименьшие значения окружной скорости

$$\omega_{\text{окр}} = R\omega, \quad (6-7)$$

где R — радиус траектории вращения частицы, м; ω — угловая скорость потока, 1/сек.

В соответствии с этим центробежные ускорения, развиваемые в этих циклонах, зависят от радиуса вращения. Чем ближе к оси, тем центробежное ускорение меньше

$$a_{\text{ц}} = R\omega^2, \quad (6-8)$$

где $a_{\text{ц}}$ — центробежное ускорение, м/сек².

Суммарное ускорение, действующее на каплю в циклоне, составляет:

$$a = \sqrt{a_{\text{ц}}^2 + g^2}, \quad (6-9)$$

где g — земное ускорение, м/сек².

Отсепарированной считается капля, достигшая в своем движении стенки циклона. Поскольку $a_{\text{ц}} \approx R$, в центральной части радиально-осевого циклона центробежные ускорения незначительны и подъемная скорость пара должна быть близкой к скорости витания капель в объеме.

Условия для сепарации капель, расположенных близко от стенок циклона, значительно лучше, чем для капель, располагаемых у оси. Из этого следует, что в радиально-осевых циклонах с пароприемным потолком, выравнивающим подъемную скорость по сечению, под-

ъемная скорость пара не может быть значительно выше, чем у объемных сепараторов.

По центру циклонов движется пар с капельками воды, на которые в основном влияет лишь сила тяжести. Однако при высоком солесодержании котловой воды нагрузка парового пространства эффективно работающих радиально-осевых циклонов оказывается выше предельно допустимой нагрузки объемных сепараторов при сравнимых условиях воднохимического режима. Это происходит вследствие того, что в циклоне более интенсивно разрушается устойчивая пена. Кроме того, высота парового объема в выносных циклонах значительно больше, чем в барабане.

Процессы в водяном объеме циклона. В водяном объеме происходит сепарация пузырьков пара. Поле скоростей в водяном объеме радиально-осевого циклона в большой степени зависит от расположения водоотводящих штуцеров, а также от наличия внутрициклонных устройств. Рассмотрим несколько вариантов.

Донный отвод воды. При вращении и одновременном организованном перемещении к центру потока воды между концентрическими слоями водяного объема имеется перепад давления, под действием которого в водяном объеме циклона образуется устойчивая воронка (рис. 6-3,а), имеющая периферийную и центральную области.

В периферийной области перепад давления может быть описан формулой

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{w_1^2}{2g} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2\theta} - 1 \right]. \quad (6-10)$$

Поскольку в каждом элементарном цилиндре радиуса R давление по высоте распределяется по закону статике $p = p_0 + \rho H$, то уравнение (6-10) описывает поверхность внешней части воронки.

Внутренняя часть воронки, ограниченная радиусом водоотводящего штуцера, имеет другое строение. Она вращается с одинаковой угловой скоростью и ее поверхность представляет собой параболу, поскольку при $\omega = \text{const}$ нет организованного движения воды от периферии к центру. Следовательно, общая конфигурация воронки в циклоне будет состоять из двух частей: внешней — гиперболической и внутренней — параболической.

Суммарная высота кривых при обычно встречающихся значениях входной скорости, соотношениях радиусов и других величин может превышать высоту водяного объема циклона. В этом случае вершина воронки втягивается в опускную трубу, захватывая пузырьки пара.

Моделирование процесса отбора воды из циклона через одно и два донных отверстия, смещенных с оси циклона на $1/2$ радиуса, показало, что при одном отверстии по оси циклона в водяном объеме образуется симметричная воронка, при одном смещенном с оси донном отверстии образуется менее развитая воронка, ось которой свернута в спираль, а при двух незащищенных донных отверстиях наблюдается устойчивая и хорошо развитая воронка.

Слой воды у стенок циклона образует сравнительно тонкое кольцо.

Из опытов с незащищенными донными отверстиями видно, что окружная скорость воды увеличивается при перемещении потоков от периферии к центру.

Если перенести результаты наблюдений с холодной на горячую воду и пар, то в уравнении (6-10) следует заменить ρ на $\rho' - \rho''$, и тогда получается несколько иное выражение

$$H = \frac{\Delta p}{g(\rho' - \rho'')} \text{ м}, \quad (6-11)$$

из которого следует, что высота воронки зависит от параметров пара. С повышением давления интенсивность образования воронок увеличивается.

Для предотвращения образования воронок применяют в основном крестовины или планки в водяном объеме и конусы с крестовинами в паровом пространстве.

Донный отвод с конусом и крестовиной. Для защиты опускных труб выносных циклонов от образования воронок применяют устройства состоящие из конуса и крестовины под ним.

Конусы устанавливают в паровом пространстве циклона между вводом пароводяной смеси и уровнем воды. Воронка над конусом имеет форму параболы. Это происходит вследствие того, что вода отбирается из верхнего пространства по узкой щели, образуемой конусом и стенкой циклона.

Крестовина разрушает организованное вращение воды и под ней имеет место поле скоростей, характерное для донных отверстий без защиты. Окружная скорость

воды увеличивается при переходе от периферии к центру Воронка при этом не образуется.

Комбинированное расположение водопроводящих труб. Совместное применение боковых и донных отводов воды из выносных циклонов встречается часто и при его моделировании установлено, что по центру циклона образуется хорошо развитая и устойчивая воронка. Установка защитных приспособлений разрушает воронку.

Боковой отвод воды. Принципиально иное явление наблюдается при организации бокового отвода воды из циклона.

Расположенный по касательной к образующей циклона боковой отвод не вызывает перемещения масс воды от периферии к центру.

Воронка не опускается глубоко и имеет форму параболы (рис. 6-3, в).

В каждом поперечном сечении угловая скорость для всех частиц одинакова.

По высоте циклона угловая скорость уменьшается сверху вниз вследствие трения о стенки и днище; ее уменьшение зависит от расхода воды через циклон.

Установлено, что увеличение расхода воды при неизменной скорости ввода уменьшает торможение воды в циклоне. Это наблюдение имеет большое значение, поскольку представляется возможным использовать часть кинетической энергии воды в опускных трубах.

На модели были проверены три различных устройства для отвода воды: донное без защиты, донное с защитой, боковое без защиты.

По этим режимам были получены зависимости перепада давления от скорости воды на входе.

Донный отвод без защиты создает гидравлическое сопротивление, величина которого зависит от расхода воды через циклон. Установка защитного приспособления уменьшает перепад давления между периферийной и центральной частью циклона.

Боковой отвод создает подпор, величина которого возрастает с повышением производительности. При организации бокового отвода воды сопротивление опускной системы циклонов может оказаться меньше сопротивления опускной системы барабана. Этот качественный скачок обусловит еще более широкое распространение выносных циклонов.

Как видно из рис. 6-4, донный отвод создает определенное сопротивление, что несколько уменьшает общую величину напора.

Боковой отвод трансформирует часть энергии вращающейся воды в статический напор, что вызывает увеличение давления на входе в опускную трубу. Циклон с боковым отводом создает подпор, т. е. работает в режиме циркуляционного насоса.

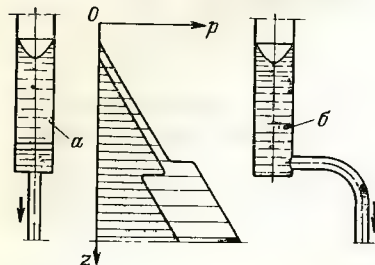


Рис. 6-4. Пьезометрические диаграммы в циклонах. а — при донном отводе; б — при боковом отводе.

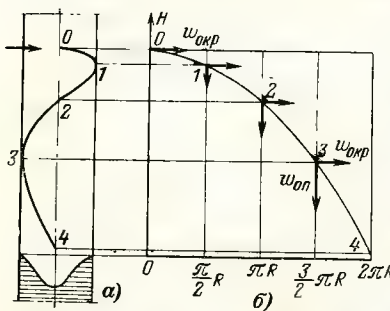


Рис. 6-5. Траектория движения струйки воды на стенке циклона. а — схема эксперимента; б — траектория струйки. 0-1-2-3-4 — последовательное перемещение частицы.

Траектории движения отдельных струек определены при обработке фотографий потоков воды, стекающих по стенкам циклона (рис. 6-5, а).

На рис. 6-5, б боковая стенка циклона развернута и траектории отдельных струек изображены в виде эмпирически построенной кривой, представляющей собой параболу. Чем ниже уровень воды в циклоне и соответственно больше высота падения струек, тем круче угол падения.

Процессы на границе раздела воды и пара. На границе раздела пара и воды происходят процессы образования и разрушения пены. При ударе струи воды об уровень может образоваться пена, разрушение которой является важным условием надежной работы циклона. Рассмотрим некоторые особенности движения воды от штуцеров ввода пароводяной смеси до уровня воды в циклоне.

Ввод пароводяной смеси в радиально-осевые циклоны осуществляется обычно выше уровня воды. Отделившаяся вода стекает по стенкам циклона сплошной пленкой.

Траектории движения отдельных струек опреде-

Угловая скорость воды по стенкам циклона при перемещении ее вниз снижается значительно быстрее, чем угловая скорость основной массы воды. Это происходит вследствие того, что масса пленки значительно меньше массы основного объема воды.

На уровне воды имеется слой пены, высота которого изменяется в зависимости от высоты падения струи, скорости ввода и концентрации примесей в воде.

Как показали измерения при моделировании на холодной воде, толщина слоя пены возрастает при увеличении энергии удара струи об уровень (рис. 6-6), а также при увеличении щелочности циркулирующей воды.

Процессы в циклонах для пароводяной смеси отличаются от наблюдаемых при моделировании на холодной воде, но хорошо объясняются принятой схемой процесса: на уровне воды в циклоне происходит образование «вторичной» пены.

Интенсивность образования «вторичной» пены зависит от высоты падения струек воды с отметки ввода пароводяной смеси до уровня, а также от химического состава воды и, возможно, от температуры насыщения.

Наряду с образованием пены происходит ее разрушение, причем интенсивность разрушения пропорциональна окружной скорости воды. Высота слоя пены обусловливается тем равновесием, которое устанавливается между этими двумя процессами.

В тех случаях, когда образование пены происходит более интенсивно, чем ее разрушение, возможно заполнение пеной всего парового объема циклона и вынос ее.

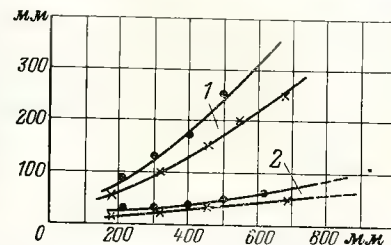


Рис. 6-6. Зависимость толщины слоя пены и эмульсии от высоты падения струи на уровень. 1 — суммарная толщина пены и эмульсии; 2 — толщина слоя пены. ● — высокая щелочность воды; × — низкая щелочность воды.

6-3. РАБОТА ЦИКЛОНОВ ПРИ КОТЛОВОЙ ВОДЕ ВЫСОКОГО СОЛЕСОДЕРЖАНИЯ

С увеличением устойчивости пены усложняется не только сепарация пара от воды, но также затрудняется выведение пузырьков пара из толщи котловой воды.

Рассмотрим процесс сепарации пара из водяного объема радиально-осевого циклона. При моделировании на холодной воде процесса разделения воды и пузырьков воздуха, увлекаемых в толщу воды, замечено, что в случае применения боковых отводов мелкие пузырьки воздуха в виде туманного облачка группируются по оси циклона. У боковых стенок вода свободна от взвешенных частиц.

На пузырьки газа в вращающейся жидкости действуют центробежные и подъемные силы.

Центробежная сила обуславливается выталкивающим центрифугирующим действием циклона на пузырьки пара. Ее величину можно определить из уравнения

$$F_{цс} = V(\rho' - \rho'') a_{ц}, \quad (6-12)$$

где V — объем капли, $м^3$;

ρ' , ρ'' — соответственно плотность воды и пара, $кг/м^3$;

$a_{ц}$ — центробежное ускорение, $м/сек^2$.

Подъемная сила, действующая на каплю,

$$F_{под} = V(\rho' - \rho'') g. \quad (6-13)$$

Эти две силы, геометрически складываясь, составляют силу

$$F = V(\rho' - \rho'') \sqrt{a_{ц}^2 - g^2}. \quad (6-14)$$

Сила сопротивления равна по величине геометрической сумме подъемных и центробежных сил и направлена в противоположную сторону.

Угол наклона относительного движения пузырька

$$\delta = \arctg \frac{a_{ц}}{g}. \quad (6-15)$$

У периферии, там где большие центробежные ускорения, пузырьки движутся к центру почти горизонтально, так как силы центробежного ускорения в большинстве случаев превосходят силу тяжести.

По центру циклона капли поднимаются вертикально (рис. 6-7).

Одним из преимуществ боковых отводов воды является более надежная сепарация пузырьков пара из водяного объема циклона.

Сепарация пузырьков пара из котловой воды особенно актуальна при высоком давлении. С повышением па-

раметров уменьшается $\rho' - \rho''$, отсюда следует важный вывод, что применение центробежной сепарации на котлах высокого давления при рациональном выполнении водоотводящих устройств может улучшать процессы циркуляции.

Боковые отводы воды, расположенные по касательной к образующей циклона, имеют преимущества перед другими конструкциями.

К этому следует добавить, что при повышении единичной производительности циклонов размещение большого числа опускных труб в днище может оказаться затруднительным, в то время как размещение отводов на боковой стенке устраняет это затруднение, позволяя увеличивать их число.

6-4. ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ПАРПРОМЫВОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

При кипящих экономайзерах хорошо зарекомендовали себя центробежные паропромывочные устройства (рис. 6-8). Большой частью питательная вода подается в циклоны, предназначенные для разделения пара и котловой воды. Если вводить питательную воду в паровой объем циклона по касательной к его образующей (рис. 6-8,а), то этот поток воды растекается по стенке тонким слоем (проверено моделированием на холодной воде). Между слоем питательной воды и вращающимся в циклоне паром возникает массообмен и, в случае недогрева питательной воды — интенсивный теплообмен. Часть солей из пара переходит в слой питательной воды и разрушение пены интенсифицируется. Питательная вода надежно прогревается. Такая схема пригодна как при некипящих, так и при сильно кипящих экономайзерах.

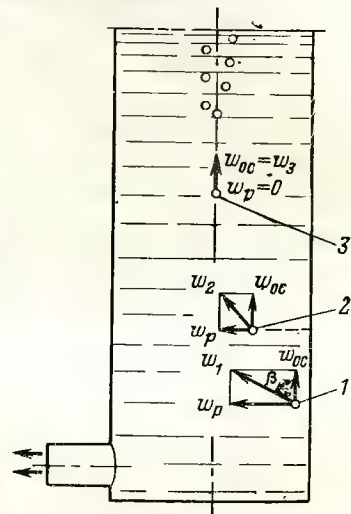


Рис. 6-7. Сепарация пузырьков пара из водяного объема циклона.

1 — пузырек у стенки циклона; 2 — то же в толще воды; 3 — то же по оси.
 w_1 , w_2 , w_3 — соответственно скорости всплывания пузырьков в точках 1, 2, 3.

В ЦКТИ разработана схема подачи питательной воды в барботажное устройство, помещаемое над циклонами (рис. 6-8,б) Эта схема предназначена для котлов с не-

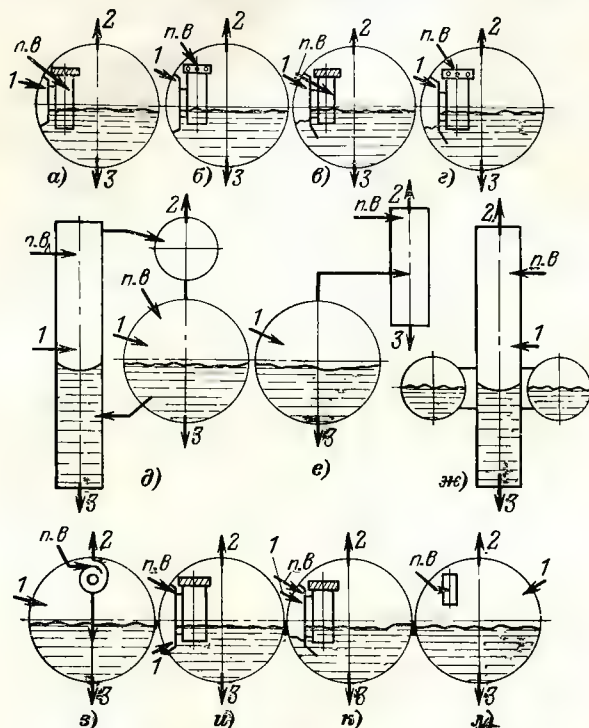


Рис. 6-8. Различные варианты центробежных паропромывочных устройств.

а — ввод питательной воды в корпуса входных циклонов; б — подача питательной воды на входной циклон; в — ввод питательной воды в корпуса промежуточных циклонов; г — подача питательной воды на промежуточные циклоны; д — ввод питательной воды в единый циклон; е — ввод питательной воды в выходной выносной циклон; ж — ввод питательной воды в безбарабанный котел; з — ввод питательной воды во внутрибарабанный выходной циклон; и и к — ввод питательной воды в паросборные замкнутые и разомкнутые короба; л — ввод питательной воды в автономные циклоны; 1 — ввод смеси; 2 — отбор пара; 3 — отбор воды; п. в. — ввод питательной воды.

основное количество циркулирующей воды в циклоны не попадает. Это обуславливает понижение солевого содержания воды в корпусе циклона и как следствие — более надежное разрушение пены.

Хотя подача питательной воды в выносные циклоны в настоящее время практикуется сравнительно редко, тем не менее возможно осуществить схемы, показанные на рис. 6-8, д—ж, которые пригодны в основном для котлов с кипящими водяными экономайзерами.

Для котлов с некипящими водяными экономайзерами, имеющими ступенчатое испарение, возможна подача питательной воды в водяные объемы циклонов и барабанов. Такая схема, разработанная и примененная Е. Ф. Бузниковым (рис. 6-8,д), оказалась надежной в работе. Регулирование подачи питательной воды в циклон дало возможность снизить отложения накипи в контурах солевых отсеков, а также в известных пределах изменить уровень воды в циклонах и соотношение солевого содержания по отсекам.

Подача питательной воды в выносной циклон, включенный на выходе пара из барабана (рис. 6-8,е), предложена Т. Х. Маргуловой. В этой схеме питательную воду для промывки можно использовать дважды: в выносном циклоне и в барабане котла.

Безбарабанный котел с уравнительными емкостями (рис. 6-8,ж) опробован Е. Ф. Бузниковым. Питательная вода вводится в циклон. Схема оказалась надежной в работе.

Очень перспективна для промышленных котлов схема, показанная на рис. 6-8,з, разработанная и опробованная Е. Д. Котеневым для котлов ШБ-А7 и ДКВР-10/13. По этой схеме питательная вода догревается и дегазируется в циклонах, включаемых на выходе пара из котла. Собственный котел надежно защищен от воздействия агрессивных газов.

На рис. 6-8, и, к даны схемы ввода питательной воды в паросборные короба. Схема, показанная на рис. 6-8, и, применяется Белгородским котельным заводом на котлах ГМ-50-1. Она используется при сильно кипящих водяных экономайзерах и тяжелых условиях воднохимического режима. Схема рис. 6-8, к опробована автором на котле ГМ-50-1 [Л. 31].

При высоком солевом содержании питательной воды целесообразно применять схему, изображенную на рис.

кипящим экономайзером. Можно осуществить также аналогичные схемы подачи питательной воды с тем отличием, что перед циклонами устанавливают разомкнутый короб для грубой сепарации (рис. 6-8,в, г), так что

6-8, л, опробованную на котле СУ-9/39 при солесодержании питательной воды до 2000 мг/кг. Питательная вода по выходе из сильно кипящего экономайзера подается в малогабаритные циклоны. Пар поступает в паровой объем барабана, а вода — для промывки пара.

Кроме схем, приведенных в § 5-1—5-4 и 6-4, возможно одновременное применение двух и более различных массообменных устройств. В каждом конкретном случае следует применять устройство, являющееся оптимальным для заданного комплекса условий.

Установлено, что сильнокипящие экономайзеры исключают применение некоторых из рассмотренных схем, поскольку потоки пара, выходящие с питательной водой, искажают поле скоростей сепарационных объемов барабана, в результате чего ухудшается качество пара котла. На выбор схем включения и типа массообменного сепаратора оказывают влияние размеры барабана, параметры пара и качество питательной воды.

6-5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИКЛОНОВ

В настоящее время нет общепризнанной методики расчета сепарирующей способности циклонов различного типа при широком диапазоне изменения давления пара и солесодержания котловой воды. Ниже приведена методика гидравлического расчета лишь отдельных элементов циклонов: устройств ввода пароводяной смеси, корпусов, паро- и водоотводящих устройств. Расчет предусматривает определение скорости, ускорения среды в различных сечениях, перепад давления, разбежку уровней воды по отсекам и в корпусах циклонов.

Устройство ввода смеси. Расчет начинают с определения допустимого перепада давления в этом устройстве, что позволяет затем подсчитать скорость среды в нем. При этом следует учитывать, что для лучшей сепарации скорость смеси надо увеличивать, а для снижения перепада давления — уменьшать.

При выборе величин допустимого сопротивления контуров циркуляции руководствуются графиком на рис. 6-9, построенным в соответствии с формулами (7-3) и (7-4).

В зависимости от типа циклонов на вводимые устройства приходится вполне определенная доля общего перепада давления:

$$\Sigma \Delta p_{\text{ц}} = \Delta p_{\text{вв}} + \Delta p_{\text{корп}} + \Delta p_{\text{вых}}. \quad (6-16)$$

Определив $\Delta p_{\text{вв}}$, подсчитывают скорость пароводяной смеси в вводимом устройстве:

$$w''_{\text{вв}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{вв}}}{\rho_{\text{см}} \Sigma \xi}}. \quad (6-17)$$

Здесь $\Sigma \Delta p_{\text{ц}}$ — суммарное сопротивление циклона, н/м²;

$\Delta p_{\text{вв}}$ — сопротивление ввода, н/м²;

$\Delta p_{\text{корп}}$ — сопротивление корпуса, н/м²;

$\Delta p_{\text{вых}}$ — сопротивление выхода пара, н/м²;

$w''_{\text{вв}}$ — скорость ввода пароводяной смеси, м/сек;

$\rho_{\text{см}}$ — плотность пароводяной смеси на входе в циклон, кг/м³;

$\Sigma \xi$ — суммарный коэффициент гидравлического сопротивления входного устройства.

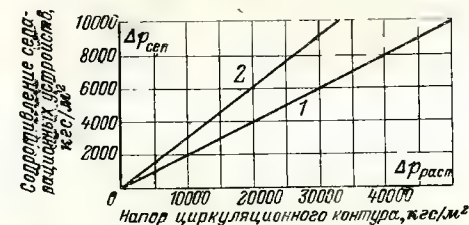


Рис. 6-9. Зависимость допустимого сопротивления сепарационных устройств от напора циркуляционных контуров.

1 — наклонные кипящие трубы; 2 — вертикальные кипящие трубы.

В формуле (6-17) неизвестны плотность пароводяной смеси и суммарный коэффициент гидравлического сопротивления.

Суммарный коэффициент гидравлического сопротивления ввода нужно брать возможно меньшим по конструктивно известной конфигурации проточной части насадков.

Плотность пароводяной смеси можно приблизительно определить по табл. 6-1.

Отношение динамического напора потока пара в корпусе циклона к статическому напору, затраченному на создание скорости пара, можно представить в виде к. п. д. вводного устройства $\Sigma \eta_{\text{вв}}$.

При заданных параметрах пара этот к. п. д. зависит от совершенства проточной части ввода, фракционного

состава пароводяной смеси и соотношения скоростей пара в элементах циклона

$$\Sigma \eta_{вв} = \eta_{гидр} \eta_{фр} \eta_{геом}, \quad (6-18)$$

где $\eta_{гидр}$ — к. п. д. гидравлический, показывающий степень совершенства выполнения проточной части ввода; $\eta_{фр}$ — к. п. д. фракционный, равный $\rho''/\rho_{см}$. Этот к. п. д. зависит от схемы включения циклона и степени совершенства предвключенного сепарационного устройства (табл. 6-1); ρ'' — плотность насыщенного пара, $кг/м^3$; $\rho_{см}$ — плотность пароводяной смеси, $кг/м^3$; $\eta_{геом}$ — к. п. д. геометрический, показывающий отношение скорости пара в корпусе циклона к скорости пара в устройстве ввода.

Таблица 6-1

Плотность пароводяной смеси и фракционный к. п. д.			
Схема включения циклонов	Влажность пара на входе, %	Плотность смеси по отношению к ρ''	Фракционный к. п. д., %
Входные	90—95	10—20	7—10
Промежуточные	50—60	2—3	30—50
Выходные	10—30	1,1—1,5	50—70

Гидравлический к. п. д. по величине обратно пропорционален суммарному коэффициенту гидравлического сопротивления устройства

$$\eta_{гидр} = \frac{1}{\Sigma \xi_{вв}},$$

где $\Sigma \xi_{вв} = \xi_{вх} + \xi_{пов} + \xi_{лин} + \xi_{вых}$;

$\xi_{вх}$ — коэффициент сопротивления входной кромки;

$\xi_{пов}$ — коэффициент сопротивления поворотов;

$\xi_{лин}$ — коэффициент трения о стенки;

$\xi_{вых}$ — коэффициент сопротивления выхода.

Коэффициент сопротивления на входе в вводное устройство в зависимости от тщательности исполнения и конфигурации может изменяться в пределах 0,01—1,0. Коэффициент сопротивления поворотов может изменяться от 0 — прямое сопло — до 0,6 — три поворота на 90°. Коэффициент трения о стенки зависит от шероховатости стенок устройства, а также длины его проточной части.

Приняв для обычно применяемых прокатных материалов $\lambda = 0,03$, а отношение L/d в пределах 5—10, получим

$$\xi_{лин} = 0,15 \div 0,3.$$

Коэффициент сопротивления выхода принимают во всех устройствах равным единице.

Суммарный коэффициент гидравлического сопротивления устройств ввода различной конфигурации (см. рис. 6-10), а также их гидравлический к. п. д. составят¹:

$$\xi_1 = 0,5 + 0,6 + 0,3 + 1 = 2,4 \text{ и } \eta_1 = 0,416;$$

$$\xi_2 = 0,5 + 0,4 + 0,2 + 1 = 2,1 \text{ и } \eta_2 = 0,47;$$

$$\xi_3 = 0,5 + 0,2 + 0,1 + 1 = 1,8 \text{ и } \eta_3 = 0,55;$$

$$\xi_4 = 0,1 + 0,0 + 0,1 + 1 = 1,20 \text{ и } \eta_4 = 0,83.$$

Как видно из этого, $\eta_{гидр} \approx 0,4 \div 0,8$, т. е. изменяется в два раза. Известны насадки, гидравлический к. п. д. которых составляет 0,99. Вводные устройства следует выполнять с таким расчетом, чтобы к. п. д. их был максимален, так как несовершенная конструкция ввода обуславливает увеличение гидравлического сопротивления, что одинаково нежелательно при питании циклонов как энергией циркуляционного контура, так и энергией избыточного давления в барабане котла.

Конфигурацию проходного сечения вводных устройств разрабатывают с таким расчетом, чтобы они имели максимальный гидравлический к. п. д.

Для повышения фракционного к. п. д. перед циклонами следует устанавливать какие-либо сепараторы. Чем выше эффективность работы предвключенных сепараторов, тем меньше влажность пара на входе в циклоны, тем выше фракционный к. п. д.

Ось струи пароводяной смеси из вводного устройства подается на стенку циклона не точно по касательной, а под некоторым углом, называемым углом падения.

От величины угла падения струн пара на стенку зависит окружающая скорость; зависимость эту выражают уравнением

$$\omega_{окр} = \omega_{вв} (\sin \varphi)^x. \quad (6-19)$$

¹ Индексы 1, 2, 3, 4 соответствуют схемам а, б, в, г рис. 6-10.

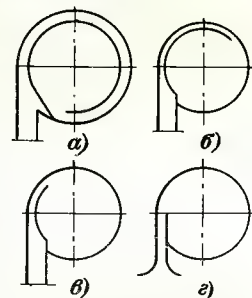


Рис. 6-10. Устройства ввода пароводяной смеси в циклоны.

а — развита улитка с поворотом на 270°; б — улитка на 180°; в — улитка на 90°; г — прямое сопло со скругленным входом.

При $\varphi=90^\circ$ — идеальный случай — окружная скорость воды и пара в циклоне равна скорости ввода смеси. При $\varphi=0^\circ$, т. е. при введении струи пароводяной смеси перпендикулярно к боковой стенке, организованного вращения в циклоне не произойдет.

Экспериментальная проверка показала хорошую сходимость наблюдаемых в модели и расчетных величин относительных окружных скоростей воды.

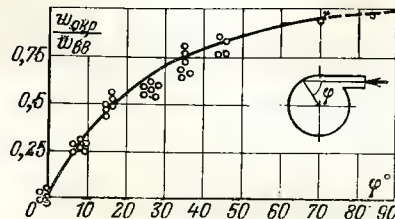


Рис. 6-11. Зависимость относительной окружной скорости воды в циклоне от угла падения струи на стенку.

На рис. 6-11 показан график зависимости относительной окружной скорости воды в циклоне от угла падения струи на стенку.

Линия, соединяющая экспериментальные точки, построена по формуле (6-19); при $x=0,5$

$$\eta_{\text{геом}} = \frac{w_{\text{окр}}}{w_{\text{вв}}} = (\sin \varphi)^{0,5}.$$

Определив оптимальную скорость ввода, подсчитывают площадь поперечного сечения вводного устройства

$$f_{\text{вв}} = \frac{V_{\text{см сек}}}{w_{\text{вв}} n}, \quad (6-20)$$

где n — число параллельно включаемых циклонов.

После уточнения конструктивных размеров производят поверочный расчет сопротивления вводного устройства.

Если определяемое сопротивление влияет на уровень воды в коробе, то снижение уровней, вызываемое этим сопротивлением, составляет:

$$\Delta H_{\text{вв}} = \frac{\Delta p_{\text{вв}}}{g(\rho' - \rho'')}, \quad (6-21)$$

где $\Delta H_{\text{вв}}$ — снижение уровня воды в коробе, м.

Корпус циклонов. Работоспособность циклонов в значительной степени зависит от конструктивного выполнения корпусов.

Центробежные ускорения в корпусе определяют по уравнению

$$a_{\text{цб}} = \frac{w_{\text{вв}}^2}{R_2} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2\theta}, \quad (6-22)$$

R_1 и R_2 — соответственно внешний и внутренний радиусы циклона, м.

Величина показателя θ для циклонов различных типов различна и составляет для радиальных циклонов 0,7 [Л. 32], для радиально-осевых циклонов 1.

При $R_1=R_2$, т. е. для периферийной части циклона, уравнение принимает вид:

$$a_{\text{цб}} = \frac{w_{\text{вв}}^2}{R_1}. \quad (6-23)$$

Гидравлическое сопротивление корпусов радиально-осевых циклонов обычно не подсчитывают ввиду его небольшой величины, а сопротивление корпусов радиальных циклонов определяют по формуле

$$\Delta p_{\text{корп}} = \frac{\rho'' w_{\text{вв}}^2}{2\theta} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2\theta} - 1 \right]; \quad (6-24)$$

обозначения те же, что и для (6-22).

В случае $R_1=R_2$ $\Delta p_{\text{корп}}=0$, т. е. давление по концентрическим окружностям в циклоне постоянно.

Сопротивление корпуса радиального циклона может быть выше, чем сопротивление ввода, что необходимо принимать во внимание при включении циклонов в контур циркуляции.

Расчетные осевые скорости пара в радиально-осевых циклонах определяют как отношение секундных объемов пара, приходящегося на один циклон, к его поперечному сечению

$$w'_{\text{ос}} = \frac{V'_{\text{сек}}}{F_{\text{ц}}}, \quad (6-25)$$

где $w_{\text{ос}}$ — осевая скорость пара в циклоне, м/сек;

$F_{\text{ц}}$ — площадь поперечного сечения циклона, м².

Нагрузка активного парового объема циклона определяется аналогично, как для объемных сепараторов:

$$A_{\text{мас}} = \frac{D_{\text{ц}}}{V_{\text{ц}}}; \quad (6-26)$$

$$A_{\text{об}} = \frac{D_{\text{ц}}}{\rho' V_{\text{ц}}}, \quad (6-27)$$

где $A_{\text{мас}}$ — массовая нагрузка парового объема циклона, $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$;

$A_{\text{об}}$ — объемная нагрузка парового объема циклона, $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$;

$V_{\text{ц}}$ — паровой объем циклона, м^3 .

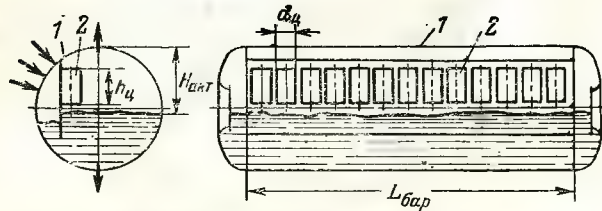


Рис. 6-12. Размещение циклонов в барабане.
1 — барабан; 2 — циклоны.

Максимально допустимая нагрузка парового объема циклонов обычно значительно больше, чем объемных сепараторов; это объясняется тем, что центробежные ускорения, как правило, существенно превосходят земное.

Для определения степени использования объема барабана при расположении в нем циклонов (рис. 6-12) можно ввести соответствующие коэффициенты:

$$k_{\text{дл}} = \frac{\Sigma d_{\text{ц}}}{L_{\text{бар}}}, \quad (6-28)$$

$$k_{\text{выс}} = \frac{\Sigma h_{\text{ц}}^*}{H_{\text{акт}}}, \quad (6-29)$$

$$k_{\text{об}} = \frac{\Sigma V_{\text{ц}}}{V''_{\text{бар}}}, \quad (6-30)$$

где $k_{\text{дл}}$, $k_{\text{выс}}$, $k_{\text{об}}$ — соответственно коэффициенты использования длины, высоты и объема барабана;

$d_{\text{ц}}$, $h_{\text{ц}}$, $V_{\text{ц}}$ — соответственно диаметр, высота и объем циклонов, м и м^3 ;

$L_{\text{бар}}$, $H_{\text{акт}}$, $V''_{\text{бар}}$ — соответственно длина, высота и объем паровой части барабана, м и м^3 .

* Иногда применяют двухрядную по высоте установку циклонов.

Коэффициенты $k_{\text{дл}}$ и $k_{\text{выс}}$ дают представление о совершенстве конструкции и размещении циклонов; $k_{\text{об}}$ — о степени загромождения парового объема барабана циклонами.

Водоперепускное сечение. Водоперепуск должен отводить всю отделяемую воду без существенного повышения уровня воды в циклонах. Расчет определяется: количеством воды, поступающее в циклон вместе с паром; коэффициент сопротивления водоперепусков; скорость воды в них; перепад давления и подъем уровня в циклоне, обусловливаемый этим сопротивлением.

Водоперепуск выходных циклонов должен иметь такое сопротивление, чтобы высота подсоса воды в нем была меньше располагаемой (рис. 6-13)

$$\Delta p_{\text{вп}} \leq k [g H (\rho' - \rho'') + \Delta p_{\text{эж}} - \Delta p_{\text{вв}} - \Delta p_{\text{корп}}], \quad (6-31)$$

$$\Delta p_{\text{вп}} > 0;$$

где $\Delta p_{\text{вп}}$; $\Delta p_{\text{вв}}$; $\Delta p_{\text{корп}}$ — соответственно сопротивление водоперепуска, ввода и корпуса, $\text{н}/\text{м}^2$;

$\Delta p_{\text{эж}}$ — перепад давлений, создаваемый эжекцией опускных труб, $\text{н}/\text{м}^2$;

H — располагаемая высота отвода воды, м ;

ρ'' ; ρ' — соответственно плотность пара и воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;

k — коэффициент запаса, меньший единицы.

Коэффициент запаса необходим, поскольку в отдельные моменты правая часть уравнения (6-31) может оказаться отрицательной величиной и вода в водоотводящей трубе потечет в обратную сторону; сепаратор при этом может превратиться в насос, что и наблюдается иногда на практике.

При малых значениях $\Delta p_{\text{вв}}$ и $\Delta p_{\text{корп}}$ целесообразно уменьшать и располагаемую высоту. Водоотводящие трубы внутрибарабанных циклонов не заводят под уровень, а на их конце устанавливают гидрозатворы, которые рекомендуется применять для устра-

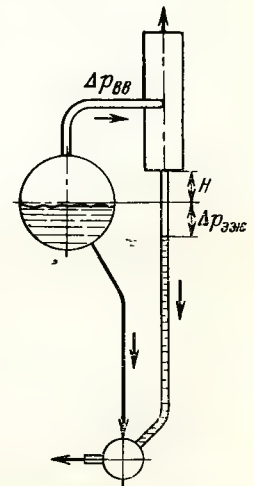


Рис. 6-13. Схема расчета водоперепуска выходного циклона.

нения возможного попадания пузырьков пара из водяного объема в водоотводящие трубы.

Пароотводящее устройство. Для радиально-осевых циклонов пароотводящее устройство выполняют в виде перфорированных потолков, расчет которых ведется так же, как расчет пароприемных потолков для объемных сепараторов.

В радиальных циклонах пароотводящее устройство располагают большей частью по центру циклона и вы-

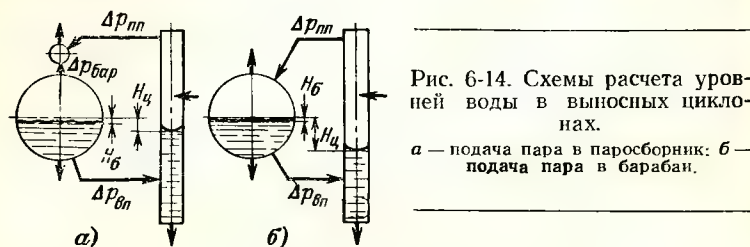


Рис. 6-14. Схемы расчета уровней воды в выносных циклонах.

а — подача пара в паросборник; б — подача пара в барабан.

полняют в виде перфорированных труб. Уменьшение диаметра этих труб улучшает процесс сепарации, но увеличивает гидравлическое сопротивление как собственно пароотводящего устройства, так и корпуса циклона из-за увеличения отношения R_1/R_2 .

Расчет выносных циклонов ведется в основном по тем же формулам, по которым рассчитывают циклоны внутрибарабанные.

Уровень воды в циклонах. Расчет уровней воды в циклонах имеет важное значение как для надежности эксплуатации, так и для эффективности работы циклонов.

Уровни в циклонах, измеряемые от оси барабана, определяют по формуле

$$H_{ц} = H_{б} + \frac{\Delta P_{бар} - \Delta P_{пп} - \Delta P_{пп}}{g(\rho' - \rho'')}, \text{ м}, \quad (6-32)$$

где $H_{б}$ — уровень воды в барабане, м;

$\Delta P_{бар}$, $\Delta P_{пп}$, $\Delta P_{пп}$ — соответственно сопротивление паров и водоотпусков (см. рис. 6-14, а).

Если пар из циклона подавать не в паросборный коллектор, а в барабан (рис. 6-14, б), то в уравнении (6-32) член $\Delta P_{бар}$ принимается равным нулю.

Сопротивление водоотпуска нужно определять при наибольшем расходе воды через него и максимальных значениях периодической и непрерывной продувки.

Общее правило при расчете уровней воды в циклонах заключается в том, что нужно стремиться к стабилизации уровня путем уменьшения величины слагаемых в уравнении (6-32). Значительное отклонение уровня от принятого среднего значения нежелательно ни в сторону повышения, ни в сторону понижения. Излишне большое сечение водоотпуска иногда обуславливает пульсацию уровня воды в барабане.

В качестве профилактики рекомендуется уменьшать диаметр водоотпусков либо устанавливать дроссельные шайбы.

Глава седьмая

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕПАРАТОРОВ

7-1. ПРЕДЕЛЬНОЕ СОЛЕСОДЕРЖАНИЕ КОТЛОВОЙ ВОДЫ

Условия воднохимического режима работы котлов определяются качеством питательной воды и величиной продувки.

В некоторых случаях при большой влажности пара заметное влияние на солесодержание котловой воды оказывает качество пара.

Повышение продувки снижает экономичность работы котлов, поэтому обычно стремятся уменьшить ее в допустимых пределах.

Качество питательной воды обуславливается качеством исходной воды, типом химической водоочистки, величиной добавки, качеством конденсата.

Требования к воднохимическому режиму сводятся в основном к следующему: обеспечивать надежную и экономичную работу теплосилового оборудования с выработкой пара требуемой чистоты при номинальной величине продувки, предотвращать образование существенных отложений на поверхностях нагрева, ограничивать скорость коррозии элементов.

Качество исходной воды в различных районах Советского Союза существенно различается.

Солесодержание поверхностных вод колеблется в пределах 40—2000 мг/кг; артезианские воды также сильно различаются по своему солевому составу.

От типа применяемой химической водоочистки зависит качество получаемой воды (табл. 7-1).

Качество возвращаемого конденсата зависит в основном от качества пара, вырабатываемого котлами. Кроме того, возможно загрязнение конденсата пара твердыми, жидкими и газообразными примесями (окислы железа, сырая вода, воздух).

Таблица 7-1

Влияние типа химводоочистки на качество получаемой воды

Тип химической водоочистки	Изменение основных показателей качества воды		
	Жесткость, мг-экв/кг	Щелочность, мг-экв/кг	Плотный остаток, мг/кг
Содоизвестковая	Уменьшается до 0,6	Уменьшается	Уменьшается
Na-катионирование	Уменьшается до 0,03—0,02	Не изменяется	Небольшое увеличение
H—Na-катионирование	Уменьшается до 0,03—0,02	Уменьшается до 0,5—1	Уменьшается
Обессоливание	Уменьшается до 0,01	Уменьшается до 0,01	Уменьшается до 0,2

Качество питательной воды зависит от процентного соотношения добавки химически очищенной воды и конденсата, а также качества этих составляющих.

По величине добавки химически очищенной воды различают следующие режимы работы установок:

конденсатный, когда потеря конденсата не превышает 2—3%; теплофикационный, при потере конденсата около 50% или при полной потере конденсата с добавкой 90—100% химически очищенной воды.

При конденсатном режиме качество добавки химически очищенной воды не оказывает решающего значения на водный режим котлов. Обычно в этом случае организуется термическое или химическое обессоливание. Стоимость обработки воды не имеет существенного значения ввиду небольшого ее количества.

На ТЭЦ с большой потерей конденсата качество добавочной воды обуславливает солесодержание питательной воды. В этих случаях стоимость обработки добавочной воды имеет существенное значение ввиду большого ее расхода.

Влияние качества конденсата возрастает с увеличением процента его возврата.

Солесодержание котловой воды является следствием того равновесия, которое устанавливается между количеством подаваемых в котел и удаляемых из него солей.

Из солевого баланса следует:

$$\frac{D_{пр}}{D_k} = \frac{S_{п.в} - S_{н.п}}{S_{к.в} - S_{п.в}}; \quad (7-1)$$

$$p = \frac{D_{пр}}{D_k} \cdot 100 = \frac{S_{п.в} - S_{н.п}}{S_{к.в} - S_{п.в}} \cdot 100\%, \quad (7-2)$$

где p — продувка, %;

$D_{пр}$ — расход продувочной воды, кг/ч;

$S_{п.в}$ — солесодержание питательной воды, мг/кг;

$S_{н.п}$ — солесодержание насыщенного пара, мг/кг;

$S_{к.в}$ — солесодержание котловой воды, мг/кг.

Наличие ступенчатого испарения стабилизирует величину продувки чистого отсека.

На солесодержание котловой воды влияет также периодическая продувка, осуществляемая из нижних точек котла для удаления шлама. Эта продувка производится обычно несколько раз в сутки.

Чем меньше непрерывная продувка, тем заметнее влияние продувки периодической.

С уменьшением непрерывной продувки увеличивается неравномерность солесодержания котловой воды во времени, что характеризуется графиком на рис. 7-1.

Переменный воднохимический режим нельзя считать нормальным как в отношении получения чистого пара, так и в получении минимальных потерь котловой воды.

Утилизировать тепло непрерывно поступающей горячей котловой воды существенно проще, чем периодических больших ее расходов.

Часто сепарационные устройства котла после достижения некоторого «критического» для данных условий

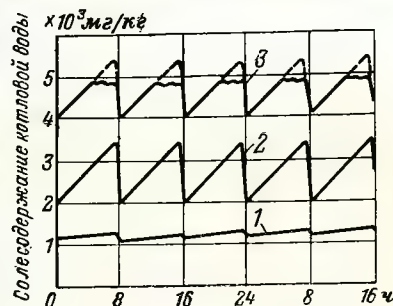


Рис. 7-1. Воднохимические режимы котлов.

1 — нормальный при непрерывной и периодической продувке; 2 — при больших периодических продувках и без непрерывной; 3 — при малых периодических продувках и без непрерывной продувки.

солесодержания котловой воды перестают справляться со своей основной задачей. Качество пара резко ухудшается, что приводит к прекращению роста солесодержания котловой воды (кривая 3, рис. 7-1).

Это имеет место при длительной работе котлов или отдельных контуров в случае отсутствия непрерывной продувки при явно недостаточной периодической.

Если сепарационные устройства недостаточно эффективны, то с достижением критического солесодержания дальнейший рост солесодержания воды прекращается (кривая 3, рис. 7-1).

Если же сепараторы обладают повышенной эффективностью, то возможно значительное увеличение солесодержания котловой воды. В качестве примера можно привести схему ступенчатого испарения с параллельно включенными выносными циклонами. Забивание отдельных линий непрерывной продувки может приводить к тому, что в одном контуре продувка поддерживается нормальной, а в других она может отсутствовать. Это вызывает пережог кипяtilльных труб вследствие отложения вторичной накипи и связанного с этим перегрева металла в отдельных точках.

Одновременно с ростом концентрации растворенных веществ повышается концентрация взвешенных веществ, что и приводит к интенсификации процессов отложения накипи.

Кроме того, возможно получение пересыщенных растворов и выпадение в осадок отдельных примесей котловой воды (например, фосфатов).

Эти повреждения имеют характерную особенность — на наиболее интенсивно обогреваемых участках снаружи появляются темные пятна перегретого металла, затем — отдулины, после чего могут появиться свищи.

На внутренней стороне такой трубы образуется слой плотных отложений толщиной 1—2 мм. В местах отдулин часть отложений бывает обычно сколота и в вершинах бугорков образованы новые слои накипи.

Имеются примеры, когда на 50% труб вновь изготовленного экрана образовались отдулины всего через 500 ч работы котла [Л. 33].

Аналогичные явления возможны и в тех случаях, когда в нормально работающей схеме искусственно уменьшают размер продувки меньше рекомендуемого по

ПТЭ, что также приводит к интенсификации отложений вторичной накипи.

Предельное солесодержание котловой воды должно определяться для каждого случая по нескольким показателям: качество пара, накипеобразование, экономическая целесообразность.

На рис. 7-2 показаны примерные границы применения основных типов сепарационных устройств для номин-

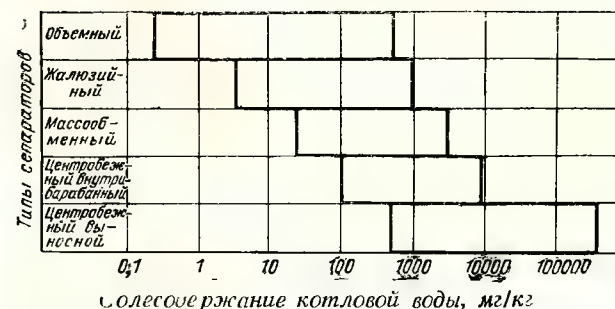


Рис. 7-2. Область применения сепараторов различных типов по условиям воднохимического режима.

нальной нагрузки активных паровых объемов сепараторов котлов среднего давления.

Как видно из диаграммы на рис. 7-2, наиболее высокое солесодержание котловой воды допускается при центробежных сепараторах.

Особенно высокой эффективностью работы обладают выносные циклоны, солесодержание воды в которых может достигать 180—200 тыс. мг/кг [Л. 34].

Нижние границы применимости различных сепарационных устройств определены по условиям конструктивной целесообразности. Так, например, нет необходимости применять выносные циклоны для котловой воды с солесодержанием менее 100 мг/л, хотя эффективность их работы при этом будет высокой.

Предельные значения солесодержания котловой воды можно подсчитать по формулам солевого баланса, а это в свою очередь позволит определить необходимый тип сепаратора. Без учета этих данных возможны: установка принципиально непригодных устройств и безуспешные попытки их наладки либо организация сепарации «с запалом», что также является неправильным решением. Вы-

бор оптимальных устройств приводит к наименьшим затратам времени и труда при достаточно надежной эксплуатации.

7-2. НАГРУЗКА ПАРОВЫХ ОБЪЕМОВ И КАЧЕСТВО КОТЛОВОЙ ВОДЫ

В практике известны случаи, когда наблюдается расхождение с данными, приведенными на рис. 7-2.

Поскольку уменьшение производительности котла при неизменном солесодержании котловой воды улучшает качество пара, то котлы малой производительности с большим паровым объемом, имея низкую нагрузку парового

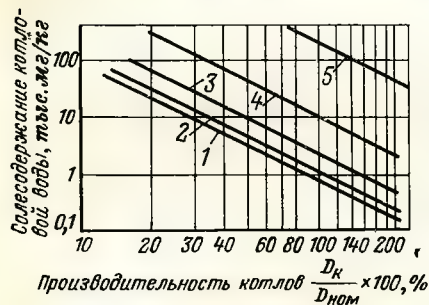


Рис. 7-3. Зависимость допустимого солесодержания котловой воды от производительности котла для сепараторов различных типов.

1 — объемный; 2 — жалюзийный; 3 — массообменный; 4 — центробежный внутрибарабанный; 5 — центробежный выносной.

объема, выдают пар высокого качества и при высоком солесодержании котловой воды.

С другой стороны, уменьшение солесодержания котловой воды позволяет повышать производительность выше номинальной.

На основе обработки большого количества данных была выявлена зависимость, связывающая нагрузку парового объема с солесодержанием котловой воды для сепараторов различных типов (рис. 7-3).

Этот график позволяет решить ряд практических задач для приближенного определения ожидаемой эффективности работы сепарационного устройства при заданном солесодержании котловой воды и относительной нагрузке ($D_K/D_{\text{ном}} \times 100\%$) котла.

Рабочая точка (пересечение относительной нагрузки парового объема с солесодержанием котловой воды), лежащая ниже линии, соответствующей применяемому типу сепаратора, показывает, что соответствующее этому устройство может удовлетворительно работать.

Если же точка пересечения лежит выше этой линии, то требуется снижать нагрузку парового объема, либо уменьшать солесодержание котловой воды.

Это в ряде случаев позволяет дать правильный ответ — следует ли искать причину плохой работы сепарационных устройств в конструктивных или монтажных недоработках либо требуется произвести принципиальную переделку с заменой сепарационной схемы.

Как показывает эксплуатационная и наладочная практика, наиболее существенное повышение эффективности работы сепарационных устройств обычно достигается заменой сепарационных устройств на более совершенные, что достаточно наглядно видно из рис. 7-3.

Можно решить и обратную задачу: часто при легких условиях воднохимического режима (например, конденсатный режим) проводятся необоснованно большие переделки с организацией многоступенчатого испарения с выносными циклонами, что не является обязательным.

7-3. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОТЛОВ НА ВЫБОР СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Конструктивные особенности котлов в ряде случаев определяют выбор сепарационных устройств. Наиболее существенными являются конструктивные особенности следующих элементов: диаметр и длина барабана; размещение паропроводящих, пароотводящих, опускных труб; подвод питательной воды; размеры и размещение лазов; высота циркуляционных контуров и наличие наклонных труб; наличие пароперегревателя; тип топочного устройства и род топлива.

Диаметр и длина барабана определяют размеры элементов внутрибарабанных сепараторов. Чем больше диаметр барабана, тем крупнее могут быть элементы сепарационных устройств в нем. С увеличением диаметра барабана возрастает расстояние от зеркала испарения до пароотводящих устройств. Этот фактор в свою очередь влияет на выбор типа, а также конструктивное оформление сепарационных устройств.

С увеличением длины барабана упрощается размещение большого числа элементов сепарации (например, внутрибарабанных циклонов). Одновременно с увеличением длины барабана возрастают трудности обеспечения равномерной паровой нагрузки отдельных участков,

усложняется задача выравнивания скоростей в паровом объеме.

Размещение пароподводящих и опускных труб в ряде случаев оказывает решающее влияние на конструктивное выполнение сепарационных устройств. Если опускные трубы, как правило, размещают по нижней образующей барабана, то подводящие трубы

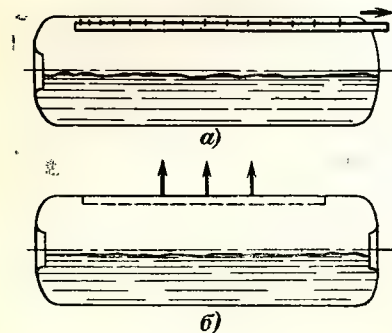


Рис. 7-4. Выравнивание отбора пара по длине барабана.

а — паросборная труба; б — пароприемный потолок.

выполняют достаточно разнообразно: ввод пароводяной смеси под уровень, в паровое пространство, смешанный ввод. По длине барабана выполняют концентрированный и рассредоточенный вводы — все это оказывает влияние на выбор конструктивных решений для внутрибарабанных устройств.

Пароотводящие трубы следует располагать в верхней части барабана, равномерно по всей длине его цилиндрической части.

В тех случаях, когда пар отводится не по всей длине барабана или концентрированно одной трубой, следует производить дополнительные сверления либо внутри барабана устанавливать паросборные устройства, обеспечивающие равномерный отбор пара по всей длине. В качестве примера на рис. 7-4, а показан отвод пара паросборными трубами через торец барабана, для чего по длине барабана установлена паросборная труба с интегральным расположением парозаборных отверстий (к глухому торцу паросборной трубы сверления делаются чаще, что выравнивает отбор пара по барабану).

При концентрированном отборе пара применяют также дроссельные пароприемные потолки, которые выравнивают поле скоростей пара по барабану (рис. 7-4, б).

Подвод питательной воды осуществляется концентрированно — одной-двумя трубами, либо по всей длине барабана. В зависимости от типа экономайзера меняются элементы конструкции. Некипящие экономай-

зеры требуют струйного распределения питательной воды для надежного подогрева ее до температуры насыщения. Слабокипящие экономайзеры позволяют организовать струйную промывку пара. При сильнокипящих экономайзерах требуется предусматривать меры для предупреждения искажения поля скоростей пара в объеме барабана.

Каждая конструкция питательных устройств должна учитывать особенность работы автоматов питания, выражающуюся в неравномерности подачи воды в котел и связанных с этим пульсаций температуры, а также паросодержания. При малых проходных сечениях возможно резкое возрастание гидравлического сопротивления, обусловливаемое кратковременными повышениями процента парообразования в экономайзере из-за уменьшения расхода воды.

Размеры и размещение лазов. Люки или лазы у барабанов котлов, выпускавшихся в различное время, а также в разных странах, неодинаковы по размерам. Поэтому перед началом конструирования сепарационных устройств требуется уточнить размеры лазов, чтобы все детали сепарационных устройств могли свободно проходить через них. Размещение люков на барабанах также неодинаково. Большинство котлов имеет торцевые люки, в то время как некоторые (ШБ, БЭ) — на боковых стенках барабана. В соответствии с этим длину элементов сепарационных устройств надо выбирать с таким расчетом, чтобы они свободно вводились внутрь барабана. В ряде случаев лазы оказываются расположенными недалеко от стен котельной, что также следует учитывать. Имеются барабаны с одним и двумя лазами, что также оказывает влияние на проработку порядка монтажа внутрибарабанных устройств и организацию фронта работ в барабане.

Высота циркуляционных контуров. Весьма важным вопросом при выборе и конструировании сепарационных устройств является учет высоты циркуляционных контуров и связанное с этим допустимое сопротивление сепараторов.

Чем выше котел и больше располагаемый напор его контуров, тем выше допустимая величина гидравлического сопротивления сепарационных устройств, которую без ущерба для надежности работы контуров можно принимать при проектировании. Однако, учитывая неравно-

мерную нагрузку параллельно включенных кипяtilьных труб, следует по возможности избегать полного использования расчетного значения сопротивления сепараторов для контуров циркуляции.

Наличие наклонных кипяtilьных труб снижает величину допустимого сопротивления вследствие того, что в таких трубах возможно расслоение пароводяной смеси и ряд других нежелательных явлений. Для контуров с наклонными кипяtilьными трубами следует ограничивать значения допустимой величины сопротивления сепараторов.

Наличие пароперегревателей обязывает к разработке более эффективных и надежных сепараторов по сравнению с устройствами для котлов, вырабатывающих насыщенный пар. Часто трубы пароперегревателя вварены непосредственно в барабан. Такая конструкция оказалась очень удобной, поскольку исключается входной коллектор, однако конструирование сепараторов в этом случае более сложно, чем при нескольких пароводящих трубах.

От вида топочных устройств и рода топлива зависит организация процесса горения и его устойчивость, что сказывается на внутрикотловых процессах. Неустойчившееся, пульсирующее горение топлива ухудшает циркуляцию и сепарацию.

Кроме указанных, модернизация сепарационных устройств требует учета ряда других факторов. Особенно внимательно нужно следить за расположением штуцеров в барабане.

На выбор принципиальной схемы сепараторов влияет также качество исходной воды, нагрузка объемов и ряд других факторов. Сопротивление сепараторов не должно вызывать ухудшения условий циркуляции.

7.4. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЕПАРАТОРОВ

Для преодоления сопротивления сепарационных устройств используется перепад давления.

В зависимости от источника потребления энергии все сепарационные устройства, используемые в СССР, можно разделить на две большие группы:

а) сепараторы, питаемые энергией циркуляционных контуров;

б) сепараторы, питаемые избыточным давлением в барабане котла.

Сепараторы, питаемые энергией циркуляционных контуров, включены так, что циркуляционный контур срабатывает некоторую часть движущего напора на преодоление сопротивления сепараторов. Циркуляционные контуры развивают довольно значительную энергию, часть которой при известных условиях (боковые отводы на выносных циклонах, см. гл. 6) можно использовать для создания подпора в опускных трубах. Величина создаваемого таким способом подпора теоретически может достигать нескольких метров водяного столба. Работа циркуляционного контура обращается в тепло, расходуемое в котле на подогрев воды, парообразование либо на перегрев пара.

Несмотря на то что потери энергии, как таковой, не происходит, высокое гидравлическое сопротивление сепарационных устройств нежелательно, поскольку это ухудшает условия циркуляции в контурах.

Повышенное сопротивление сепараторов обуславливает неравномерное уменьшение подъемной скорости пароводяной смеси в кипяtilьных трубах.

В хорошо обогреваемых трубах скорость уменьшается сравнительно мало, в слабо обогреваемых (например, угловых) возможно даже появление отрицательной скорости (рис. 7-5) [Л. 35]. Кратность циркуляции в контуре уменьшается, что способствует интенсификации отложений накипи в трубах.

Экспериментальное исследование этого вопроса показало, что с уменьшением скорости движения воды в трубах количество отложений увеличивается [Л. 36].

Следовательно, для данной группы сепараторов можно сформулировать общее правило: сопротивление сепарационных устройств, питаемых энергией циркуляционных контуров, должно быть согласовано с движущими напо-

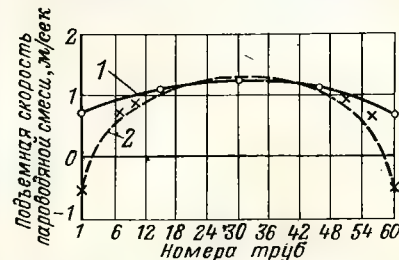


Рис. 7-5. Влияние сопротивления сепарационных устройств на поле подъемных скоростей в экраных трубах.

1 — малое сопротивление; 2 — большое сопротивление.

рами этих контуров. Желательно применение сепараторов минимального сопротивления.

Сепараторы, питаемые избыточным давлением в барабане котла. Если включить сепараторы на выходе пара из барабана (рис. 7-6), то в них будет срабатываться избыточное давление пара в барабане.

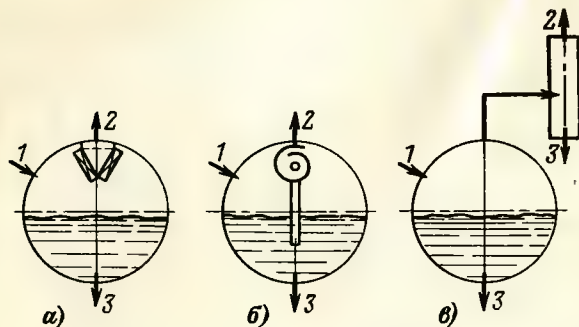


Рис. 7-6. Типы сепараторов, включаемых на выходе пара из барабана.

а — жалюзий; б — внутрибарабанные циклоны; в — выносные циклоны; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды.

В энергетических котлах, вырабатывающих пар для турбин, значительное сопротивление сепараторов нецелесообразно, поскольку при этом снижается работоспособность пара, так что и в этом случае повышение гидравлического сопротивления сепараторов нежелательно.

Вместе с тем в ряде случаев высокое сопротивление циклонов является неизбежным (см. гл. 6).

Следовательно, для энергетических котлов выходные сепараторы большого сопротивления применять нецелесообразно.

Для котлов, пар от которых не используется для выработки электрической энергии, потеря давления не вызывает существенных энергетических потерь (может лишь несколько увеличиться расход электрической энергии на питательные насосы).

Повышение давления в барабанах промышленных котлов улучшает процессы сепарации вследствие уменьшения удельного объема вырабатываемого пара (для котлов, которые работают с пониженным против расчетного давлением пара).

Дросселирование пара в сепараторах и переход его в область перегрева вызывает испарение мелких капель, что при значительном его солесодержании может привести к отложению солей в паропроводах.

Для промышленных котлов величина сопротивления должна составлять не более 300—500 кгс/м². Для энергетических котлов среднего давления, обладающих большими движущими напорами контуров циркуляции, повышение сопротивления сепараторов возможно в пределах 500—1 000 кгс/м² (см. рис. 6-9).

Для устройств, питаемых энергией избыточного давления в барабане, можно принимать гидравлическое сопротивление 1 000—2 000 кгс/м².

С повышением центробежных ускорений возрастают допустимые нагрузки паровых объемов циклонов (см. гл. 6).

Ускорения в циклонах, включаемых на выходе пара из барабанов, могут быть, как правило, выше, чем ускорения в циклонах, включаемых в циркуляционные контуры. Соответственно этому габариты выходных циклонов можно существенно уменьшить, что является важным преимуществом внутрибарабанных устройств.

По-видимому, наиболее простым критерием при определении допустимой величины гидравлического сопротивления сепараторов для различных контуров циркуляции явится определенная часть располагаемого напора контура.

При практических разработках не следует превышать выбранных максимальных значений сопротивления.

Обработка эксплуатационных данных, результатов теплотехнических испытаний показывает, что гидравлическое сопротивление сепараторов, составляющее 20—30% располагаемого напора контура, практически незначительно влияет на режим циркуляции (а следовательно, и на интенсивность отложений накипи в трубах).

Можно принять следующие максимальные значения сопротивления сепараторов:

для наклонных кипятильных труб

$$\Delta p_{с.у} \leq 0,2 \Delta p_{расп}, \quad (7-3)$$

для вертикальных кипятильных труб

$$\Delta p_{с.у} \leq 0,3 \Delta p_{расп}, \quad (7-4)$$

где $\Delta p_{\text{с.у}}$ — гидравлическое сопротивление сепарационных устройств для контура циркуляции, кгс/м²; $\Delta p_{\text{расп}}$ — располагаемый напор контуров циркуляции, кгс/м².

Для определения влияния на условия циркуляции гидравлического сопротивления сепараторов, питаемых избыточным давлением пара в барабане, за исходный показатель принимают неизменным давление пара на выходе из барабана; в этом случае увеличение сопротивления сепаратора будет вызывать и повышение давления в котле. Соответственно увеличится плотность пара и уменьшится плотность воды:

$$\Delta p_{\text{прив}} = Hg[(\rho'_1 - \rho''_1) - (\rho'_2 - \rho''_2)], \quad (7-5)$$

где индексы 1 и 2 относятся к давлению пара до и после установки сепараторов; H — высота контура, м.

Формуле (7-5) можно придать следующий вид:

$$\Delta p_{\text{прив}} = Hg[(\rho'_1 - \rho'_2) + (\rho''_2 - \rho''_1)]. \quad (7-5a)$$

Величина приведенного сопротивления оказывает незначительное влияние на работу контуров.

7-5. УСЛОВИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ В КОНТУРАХ И СОПРОТИВЛЕНИЕ СЕПАРАТОРОВ

При выборе сепарационных устройств необходимо учитывать те изменения, которые они могут вызвать в работе циркуляционных контуров. Наиболее важным для работы контуров циркуляции является гидравлическое сопротивление сепараторов. Если устанавливаемые новые устройства имеют большее сопротивление, то следует проверить, не превышаются ли при этом значения, определяемые по формулам (7-3) и (7-4).

При меньшем сопротивлении ухудшение условий циркуляции исключается с большей вероятностью. Чем выше сопротивление сепараторов, тем труднее добиться нормальной работы контуров. Высокое сопротивление преимущественно создают циклоны, но возможно получение достаточно большого сопротивления и в элементах сепараторов типа коробов (особенно пароперепускных).

Из большого числа сепарационных схем необходимо исключить все схемы, ухудшающие циркуляцию.

В случае применения ступенчатого испарения часто наблюдается отложение вторичной накипи в контурах

солевых отсеков, что является следствием повышенной концентрации примесей в котловой воде этих отсеков, а также большого сопротивления сепараторов (обычно циклонов) и вялой циркуляции (особенно при пониженных уровнях воды в выносных циклонах). Поэтому при выборе сепарационных устройств ступенчатое испарение следует применять лишь в тех случаях, когда это вызывается необходимостью. Очень перспективным является применение в солевых отсеках предвключенных циклонов грубой сепарации [Л. 37] либо двойных циклонов [Л. 38] (рис. 7-7).

В обеих схемах первичные циклоны работают на малых скоростях пароводяной смеси, что и обуславливает малое их гидравлическое сопротивление. Вторичные циклоны работают на повышенных скоростях ввода пароводяной смеси, но поскольку частично сепарация уже производилась, то плотность пароводяной смеси невысока, так что получаются приемлемые значения перепада давления, который не сказывается на циркуляционном контуре и вызывает лишь расхождение уровней.

Режим горения оказывает значительное влияние на надежность циркуляции. При стабильном горении циркуляция более надежна. Это отмечалось еще в работах Э. И. Ромма. Стабильность горения пылевидного топлива зависит от его природы. В камерных топках стабильность горения зависит от выхода летучих топлива, степени экранирования топок, теплового напряжения топочного объема, степени зашлакованности труб, состояния зажигательных поясов и ряда других причин. Особенно неблагоприятные условия для надежного охлаждения стенок кипяtilьных труб создаются при одновременном воздействии двух факторов — пульси-

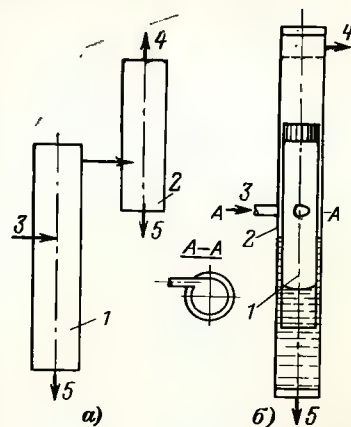


Рис. 7-7. Последовательное включение выносных циклонов. а — два отдельных корпуса; б — совмещенные корпуса. 1 — циклон грубой сепарации; 2 — циклон тонкой сепарации; 3 — ввод пароводяной смеси; 4 — отбор пара; 5 — отвод воды.

рующем, неустойчивом горении и высоком сопротивлении сепарационных устройств. В качестве примера можно привести камерное сжигание углей марки АШ, имеющих пульсирующий характер, что и приводит к нарушению циркуляции в солевых отсеках. Хорошо стабилизируют горение зажигательные пояса.

Жидкое топливо тоже, хотя и в меньшей степени, способно гореть в пульсирующем режиме. При сжигании мазута повышаются удельные тепловые нагрузки, что изменяет условия циркуляции.

Наибольшей устойчивостью горения обладает газообразное топливо.

Кроме пульсации горения большое значение имеет величина местных максимальных тепловых нагрузок участков кипящих труб. Замечено, что котлы, длительное время надежно работавшие на твердом топливе, при переводе на мазут либо газ становились экс-

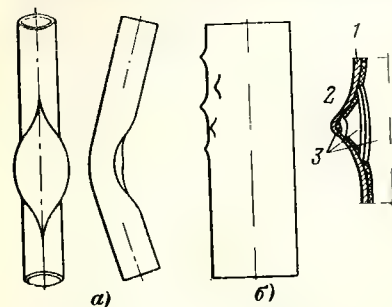


Рис. 7-8. Повреждения экранных труб.

а — циркуляционный разрыв; б — отслоения накипи.
1 — нормальная стенка трубы; 2 — вытянутая стенка трубы; 3 — слои накипи.

плуатационно ненадежными в результате появления многочисленных аварий из-за пережога труб. Для ликвидации аварий потребовалось резко улучшить воднохимический режим, обеспечивающий работу котлов практически без накипи.

Ниже приведены основные причины повреждений труб, о которых можно судить по характеру вызываемых ими повреждений.

Упуск воды из отдельного контура или из всего котла вызывает повреждение большого числа труб (отдулины), а иногда также один-два разрыва (рис. 7-8,а).

В солевых отсеках котла с выносными циклонами упуск воды возможен при чрезмерном сопротивлении пароотводящего тракта от циклонов к барабанам. Возможен также упуск уровней из отсеков при интенсивных периодических продувках нижних точек. Для устранения чрезмерного понижения уровня при периодических про-

дувках следует ограничивать расход воды через нижние точки установкой дроссельных шайб.

Аналогичные разрывы имеют место при скоплении значительных количеств шлама в нижней части труб. После разрыва трубы весь шлам обычно выдувается, что существенно затрудняет анализ причин повреждений. Необходимо принимать меры для устранения причин шламообразования. Признаки — наличие шлама в соседних трубах и нижних коллекторах.

Циркуляционные повреждения отдельных труб, имеющие вид, показанный на рис. 7-8,а, появляются в трубах со слабой циркуляцией при пульсирующем факеле.

Обычно повреждаются угловые (или рядом расположенные) трубы. В качестве мероприятия по устранению таких повреждений следует стабилизировать процесс горения при одновременном снижении сопротивления сепарационных устройств.

Отложения накипи на внутренних поверхностях труб можно подразделить на три вида: первичные, вторичные и смешанные.

Меры борьбы — для конденсационных режимов — улучшение деаэрации питательной воды, уменьшение сопротивления сепарационных устройств, увеличение продувки. При ступенчатом испарении хорошие результаты дает рециркуляция части котловой воды из солевых отсеков в чистый. Вторичная накипь обуславливает появление своеобразных повреждений труб (рис. 7-8,б). На трубе располагается много небольших наростов — отдулин, накипь с которых на внутренней стороне частично сколота. На вершине таких отдулин возникают свищи. Отдулины расположены на обогреваемых участках труб с наибольшей тепловой нагрузкой.

Смешанные накипи имеют в своем составе элементы первичных и вторичных накипей. Кроме улучшения воднохимического режима хорошие результаты дает улучшение циркуляционных характеристик контуров, в частности — снижение сопротивления сепарационных устройств.

При снижении давления пара в барабане (часто практикуемого в промышленной энергетике) располагаемый напор циркуляционных контуров увеличивается, но одновременно с этим растет и сопротивление сепарационных устройств. Поэтому всегда при снижении дав-

ления пара в барабанах следует пересчитывать сопротивление сепараторов.

Для выносных циклонов возможно существенное снижение уровня воды в них, что может привести к пережогу экранных труб в результате упуска уровня воды из циклонов и ухудшения охлаждения труб водой.

Для серийных промышленных котлов с выносными циклонами, по-видимому, требуется принимать выход пара большим сечением с таким расчетом, чтобы и для случая понижения давления сопротивление пароотводящего тракта от циклонов к барабану не превышало определенных значений.

Если сравнить рекомендуемые перепады давления для сепараторов, определяемые по формулам (7-3) и (7-4), с сопротивлением широко распространенных в настоящее время циклонов $3\,000\text{--}10\,000\text{ кгс/м}^2$, то станет очевидным определенное несоответствие.

В тех случаях, когда наблюдаются существенные отложения накипи в кипяtilьных трубах, нужно обязательно, кроме наладки воднохимического режима, проверять соответствие сопротивления сепараторов максимально допустимым расчетным данным. Поэтому применение в котлах низкого и среднего давления схем с входными циклонами рекомендуется лишь с одновременным применением труб рециркуляции.

Циклоны можно применять в качестве промежуточных и выходных сепараторов. При этом (см. гл. 6) сопротивление циклонов для контуров циркуляции резко уменьшается.

7-6. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕПАРАТОРОВ

Увеличение размеров барабанов связано со значительными затратами средств, поэтому диаметр и длину барабанов выбирают минимально допустимыми по условиям надежной работы сепарационных устройств. Это условие отражается на характере монтажных и ремонтных работ, выполняемых в барабанах котлов.

Ввиду стесненности и ряда других особенностей работы в барабанах проводятся сравнительно медленно — одновременно работают не более двух человек.

К конструкции внутрибарабанных устройств предъявляются следующие требования:

1. Достаточная эффективность по условиям солесодержания котловой и питательной воды.

2. Удобное расположение элементов сепараторов в барабане в соответствии с местами вводов и выводов рабочей среды.

3. Малое влияние сопротивления устройств на условия циркуляции.

4. Рациональное использование парового объема барабана.

5. Малая громоздкость.

6. Высокая надежность эксплуатации.

7. Приемлемые затраты труда и времени.

Оптимальным считается следующее размещение штуцеров на стенке барабана (рис. 7-9): ввод пароводяной смеси 2 и питательной воды 1 — на боковых стенках по всей длине барабана; отбор пара и предохранительные клапаны — в верхней части барабана 3; опускные трубы — в нижней части барабана 4. Все эти штуцера располагают равномерно по длине цилиндрической части барабана.

На сферических днищах кроме лазов стараются не размещать никаких штуцеров (иногда в сферических днищах делают вывод непрерывной продувки, ввод реагентов, например фосфатов, выводы для импульсов от положения уровня воды в барабане). При открытии люки не должны задевать за детали сепараторов.

В тех случаях, когда имеется запас парового объема барабана, представляется возможным применять сравнительно малоэффективные сепараторы.

В случае изменения конструкции котла (например, изменения процента кипения в экономайзере) соответственно этому в отдельных случаях следует менять конструкцию внутрибарабанных устройств. Несовершенство внутрибарабанных устройств (либо существенное отклонение от оптимальных мест ввода среды) могут обусловить попадание пузырьков пара в опускные трубы, что приводит к ухудшению циркуляции.

При среднем и низком давлении совершенно недопустимо попадание недогретой питательной воды в опуск-

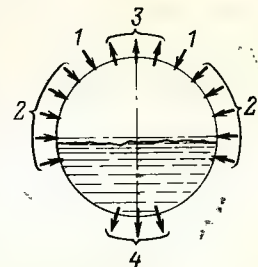


Рис. 7-9. Размещение штуцеров на стенке барабана.

1 — ввод питательной воды; 2 — подвод пароводяной смеси; 3 — пароотводящие трубы; 4 — опускные трубы.

ные трубы. Это ведет к ухудшению условий циркуляции, поскольку увеличение движущего напора вследствие повышения плотности воды намного перекрывается уменьшением парообразования в трубах и повышением из-за этого длины экономайзерного участка. Кроме того, соприкосновение холодной воды со стенками барабана вызывает термические напряжения в них, что в свою очередь может привести к появлению трещин.

Сепарационные устройства влияют на распределение потоков пара по барабану. Козырьки и перегородки ставят в основном для выравнивания поля скоростей по длине и ширине барабана.

Кроме того, часто удается разместить сепараторы на боковых стенках барабана. Чем более компактно размещается такое сепарационное устройство, тем большие преимущества оно имеет перед другими.

Центробежные сепараторы являются одними из наиболее громоздких, что приходится учитывать при подборе требуемого типа сепараторов. При уменьшении их габаритных размеров возрастает нагрузка паровых активных объемов, что в свою очередь усложняет процессы сепарации.

Преимуществами компактных сепарационных устройств являются упрощение монтажа, ревизии, а также ремонтных работ внутри барабана. Оптимально сконструированные устройства способствуют обеспечению более свободного перемещения ремонтного персонала внутри барабана при сохранении возможности осмотров и мелких работ без демонтажа устройств.

Снижение эксплуатационной надежности сепарационных устройств обуславливается рядом обстоятельств.

а) В барабане котла процессы протекают достаточно бурно. Большие массы воды и пара вводятся в барабан со скоростью 5—10 м/сек, переменной во времени. Поэтому прочность внутрибарабанных устройств должна быть достаточной для того, чтобы выдержать все механические нагрузки, возникающие при работе котла.

б) В ряде элементов возможны термические напряжения в результате появления разницы температур, например, при неудовлетворительной приварке на большой длине тонких листов к толстой стенке барабана. После нескольких месяцев эксплуатации в стыках листов сварные швы иногда разрушаются. Это происходит из-за того, что стенка барабана и перегородка прогре-

ваются с различной скоростью, что и способствует появлению термических напряжений.

в) Способностью отдельных элементов сепарационных устройств к забиванию различными отложениями, в особенности щелей шириной 2—3 мм, например в жалюзи.

г) Возможны процессы электрохимической коррозии.

д) Необходимо сортамент металла внутрибарабанных устройств выбирать близким к сортаменту металла, из которого изготовлен барабан. Применение цветных металлов недопустимо. Применение нержавеющей стали для внутрибарабанных устройств нежелательно.

Существенное влияние на выбор сепарационных устройств оказывает их стоимость.

Обобщая имеющиеся данные, можно отметить большое разнообразие конструктивных решений отдельных элементов циклонов.

Корпус (рис. 7-10). Расположение корпусов возможно вертикальное как с восходящим, так и нисходящим потоком пара, горизонтальное и наклонное; по форме корпуса выполняют цилиндрические, винтовые, сферические, зубчатые, конические; корпуса могут быть выполнены как сплошными, так и перфорированными. Применяют корпуса с различными устройствами внутри их в виде крестовины, планки, конуса с крестовинами. Только корпуса со встроенными в них устройствами могут быть выполнены в большом числе вариантов.

Форма корпуса мало влияет на эффективность работы циклона, и различные формы циклонов не имеют одна перед другой существенных преимуществ. Поэтому изыскание новых конфигураций, а также проработка известных их разновидностей мало перспективны.

Из многих вариантов следует выбрать простейший в исполнении цилиндрический корпус. Общая тенденция при выборе конструкции корпусов заключается в уменьшении их диаметра и подборе оптимальной высоты. Следует по возможности избегать загромождения корпусов внутрициклонными устройствами.

Ввод пароводяной смеси (рис. 7-11), так же как и корпус, можно выполнить во многих вариантах: по всей длине корпуса несколькими трубами и сосредоточенно в одном месте; с применением различного рода улиток и без них; по касательной и нормально к боковой поверх-

пости. Многие из этих вариантов описаны в патентной литературе либо применяются в промышленности.

Из возможных вариантов следует отобрать несколько наиболее эффективных. Вводное устройство должно иметь оптимальную в отношении гидродинамики форму

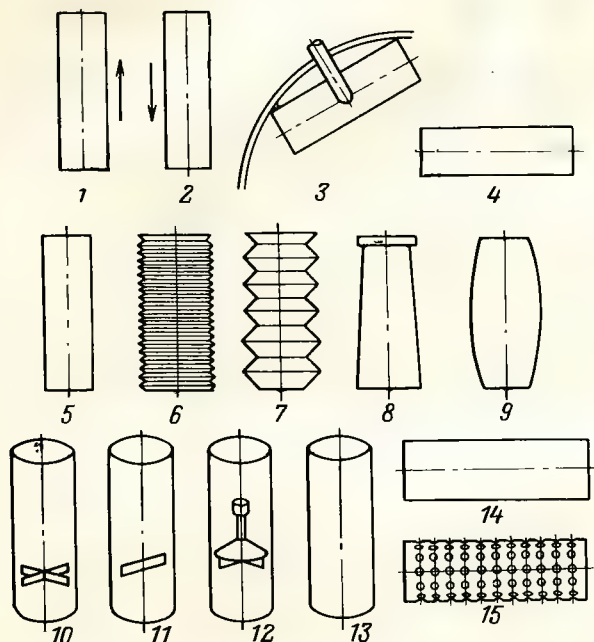


Рис. 7-10. Конструкция корпусов циклонов.

1, 2 — вертикальные (восходящий и нисходящий); 3 — наклонный; 4 — горизонтальный; 5 — цилиндрический гладкостенный; 6 — резбовидный; 7 — зубчатый; 8 — конический; 9 — бочкообразный; 10, 11, 12, 13 — со встроенными крестовиной, планкой, конусом с крестовиной, без внутренних устройств; 14, 15 — сплошной и перфорированный.

проходного сечения. Ширина и высота его оказывают большое влияние на внутрициклонные процессы, поэтому определению этих величин следует уделять большое внимание (см. гл. 6).

Отбор пара (рис. 7-12) так же можно выполнить во многих вариантах: общий и фракционный; по центру циклона и по боковой образующей; торцевой и смешанный; по всему сечению в виде сплошной щели; рядом

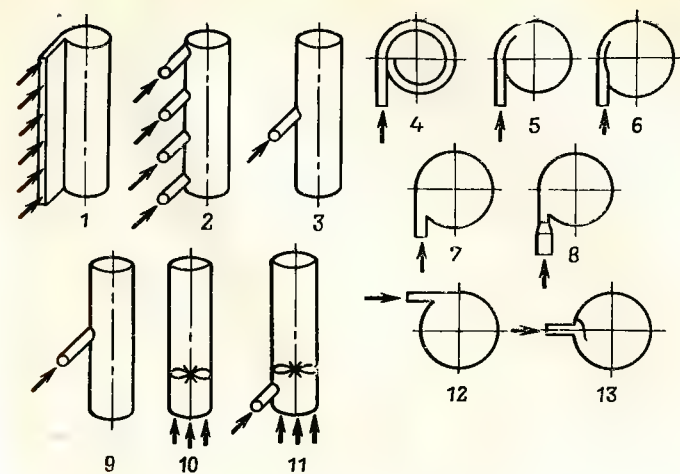


Рис. 7-11. Конструкция входных устройств в циклоны.

1 — щель; 2 — ряд труб; 3 — одна труба; 4 — разветвленная улитка на 360°; 5 — улитка на 90°; 6 — улитка на 45°; 7 — прямое сопло; 8 — коническое сопло; 9 — ввод по боковой образующей; 10 — осевой ввод; 11 — смешанный ввод; 12 — ввод по касательной; 13 — ввод по нормали.

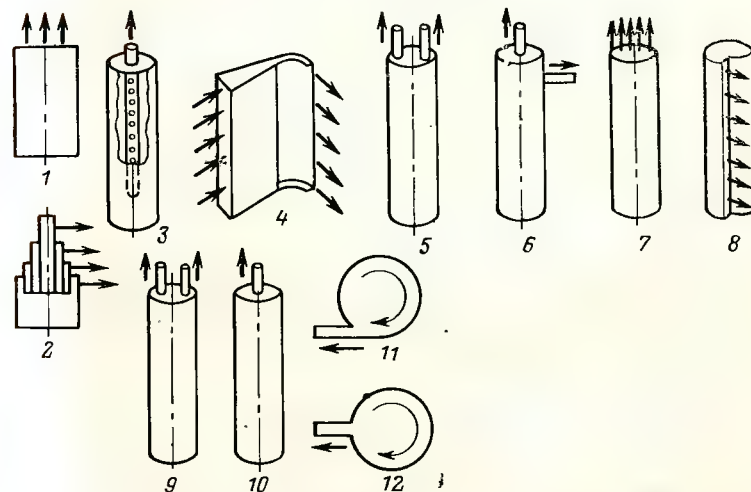


Рис. 7-12. Конструкция отвода пара из циклона.

1 — всем сечением; 2 — фракционный; 3 — по центру перфорированной трубой; 4 — сплошной щелью; 5 — торцевой двумя трубами; 6 — смешанный отвод; 7 — всем сечением; 8 — щелью; 9 — несколькими трубами; 10 — одной трубой; 11 — по касательной к образующей; 12 — нормально к образующей.

труб и концентрированно одной трубой; нормально и по касательной к боковой образующей.

Поскольку конструкция отбора пара предопределяет характер внутрициклонного процесса и тип циклона, к выбору ее следует подходить с большой осторожностью, добиваясь оптимального внутрициклонного процесса. Если имеется возможность срабатывать большие перепады давления, то можно устанавливать отбор пара

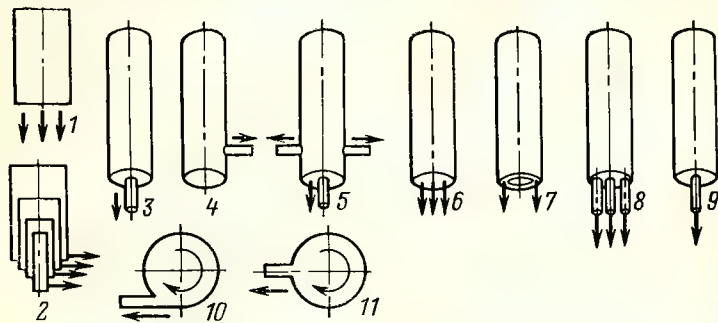


Рис. 7-13. Конструкции отвода воды из циклонов.

1 — всем сечением; 2 — фракционный; 3 — одной трубой из дна; 4 — одной трубой, боковой отвод; 5 — смешанный; 6 — всем сечением; 7 — кольцевой щелью; 8 — несколькими трубами; 9 — одной трубой; 10 — по касательной к образующей; 11 — нормально к образующей.

по центру. Фракционный отбор вследствие повышенной сложности исполнения можно не применять.

В радиально-осевых циклонах пар отбирается из верхнего торца. В этом случае хорошо работают жалюзи на циклонах. В радиальных циклонах пар целесообразно отбирать из центра циклона.

Отвод воды (рис. 7-13), как и отбор пара, можно выполнить во многих вариантах: общий и фракционный; донный, боковой и смешанный; всем сечением, щелью; рядом труб, одной трубой; по нормали и по касательной к корпусу.

Из этих вариантов представляется целесообразным оставить несколько наиболее удачных. Водоотводящее устройство должно быть несложным конструктивно и обеспечивать работу циклона с надежным отводом отсепарированной влаги с наименьшими гидравлическими потерями.

При выборе конструкции узлов циклона следует руководствоваться соображениями максимального их

упрощения, проводимого без ущерба для эффективности работы циклона. У внутрибарабанных циклонов излишнее усложнение узлов повышает трудозатраты и угрожает барабаны. Узлы сложной конфигурации обладают повышенным гидравлическим сопротивлением, что снижает надежность работы котла. Неоднократно отмечалось, что неудачное выполнение водоотводящих устройств повышало уровень во внутрибарабанных циклонах, вследствие чего ухудшалась их работа.

В распространенных внутрибарабанных циклонах (рис. 1-4, а, б, г) водоотводящие устройства выполнены в виде кольцевой щели с направляющими лопатками при сопротивлении 100 кгс/м^2 .

Отвод воды радиально-осевых циклонов следует осуществлять через боковые трубы. Для внутрибарабанных промежуточных циклонов специальных устройств можно не делать вследствие небольшого количества отводимой воды.

Приведенный краткий перечень конструктивных разновидностей элементов циклонов показывает, что центробежные сепараторы, являющиеся конструктивно наиболее сложными устройствами, могут иметь чрезвычайно большое разнообразие элементов. Выбирать следует конструктивно легко выполнимые элементы, обладающие достаточной эффективностью.

Основными требованиями являются: уменьшение диаметра корпуса; уменьшение сопротивления, повышение гидравлического к. п. д. ввода смеси; создание требуемой конфигурации потока пара в циклоне при выборе конструкции отбора пара; уменьшение сопротивления отводов воды.

7-7. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СЕПАРАТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Объемные сепараторы. Во всех барабанных котлах паровые объемы используются для сепарации пара и воды. Чисто объемные сепараторы встречаются сравнительно редко из-за невысокого их к. п. д. Часто объемные сепараторы применяют совместно с жалюзийными.

Жалюзийные сепараторы получили широкое распространение как в малых, так и в больших энергетических котлах из-за того, что в них удачно сочетается

ряд положительных свойств: малое гидравлическое сопротивление, надежность гашения повышенной скорости местных потоков пара, компактность. Эти сепараторы применяются без каких-либо ограничений на самых разнообразных котлах.

Массообменные сепараторы (паропромысловые устройства) в промышленной энергетике применяются весьма широко. В подавляющем большинстве случаев для промывки пара используется питательная вода, обладающая способностью уменьшать солесодержание пара. При питательной воде с высоким солесодержанием применять лоднятые барботажные сепараторы не рекомендуется.

Таблица 7-2

Области применения объемных, струйных и барботажных массообменных устройств

Номер рисунка	Давление пара			Диаметр барабанов		Тип экономайзера			Качество питательной воды			
	низкое	среднее	высокое	малый	большой	без экономайзера	слабокипящий	сильнокипящий	Солесодержание		Деаэрация	
									малое	высокое	плохая	хорошая
5-1, а	+	±	—	±	±	±	±	—	+	+	—	+
5-1, б	+	+	—	±	±	±	±	—	+	+	—	+
5-2, а	+	+	—	—	+	—	±	—	+	+	—	+
5-2, б	+	+	+	—	+	+	±	—	+	+	—	+
5-3, а	+	+	—	+	+	+	±	—	+	+	—	+
5-3, б	—	±	+	±	+	+	±	—	+	—	—	+

Примечание. „+“ — целесообразно; „±“ — применение ограничено; „—“ — не рекомендуется.

Каждый из указанных в § 5-1 типов массообменных сепараторов имеет определенную область применения (табл. 7-2 и 7-3) в зависимости от давления пара, диаметра барабанов, режима работы экономайзеров и качества питательной воды.

Ни одна из приведенных в табл. 7-2 схем не применима ни при сильно кипящих водяных экономайзерах, ни при плохой деаэрации питательной воды. Все схемы пригодны для питательной воды высокого солесодержания (кроме схемы 6-8,б). Для барабанов большого диа-

метра применимы все виды сепараторов, для малого — лишь некоторые.

Значительно более широкие возможности имеют центробежные массообменные устройства (табл. 7-3). Они все без исключения применимы для котлов низкого и среднего давления, что особенно существенно для промышленной энергетике. Многие из приведенных схем

Таблица 7-3

Области применения центробежных массообменных устройств

Обозначение схем на рис. 6-8	Давление пара			Диаметр барабанов		Тип экономайзера			Качество питательной воды			
	низкое	среднее	высокое	малый	большой	без экономайзера	слабокипящий	сильнокипящий	Солесодержание		Деаэрация	
									малое	высокое	плохая	хорошая
а	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	—	+
б	+	+	+	±	+	+	+	—	+	—	—	+
в	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	—	+
г	+	+	+	±	+	+	+	—	+	—	—	+
д	+	+	+	±	+	+	+	+	+	+	—	+
е	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
ж	+	+	±	+	+	+	+	+	+	+	—	+
з	+	+	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+
и	+	+	+	+	+	+	+	+	±	+	—	+
к	+	+	+	+	+	+	±	+	±	+	—	+
л	+	+	+	+	+	—	±	+	+	+	—	+

Примечание. „+“ — целесообразно; „±“ — применение ограничено; „—“ — не рекомендуется.

применимы для барабанов малого диаметра, что также является их достоинством. Схемы рис. 6-8,а—к можно применять для котлов без экономайзеров, надежно прогревая недогретую питательную воду. Для слабокипящих экономайзеров практически все схемы применимы. Для сильнокипящих экономайзеров не применимы схемы рис. 6-8,б и г, в которых питательная вода подается сверху на перфорированный лист, размещаемый над циклонами. Эти же схемы рис. 6-8,б и г не рекомендуется применять при сильно минерализованной питательной воде. Для остальных схем солесодержание питательной воды не ограничивается: циклоны разрушают сильноустойчивую пену.

Некоторые схемы (рис. 6-8, *и, к*) не создают эффективного массообмена, но они применимы при сильно-кипящих экономайзерах и высоком солесодержании питательной воды.

Следует особо рассмотреть схемы рис. 6-8, *е* и *з*. В этих схемах предусматривается подогрев и деаэрация питательной воды, что позволяет в известной мере защитить собственно котел от коррозии. Схема *е* несколько хуже, поскольку выносной циклон является сосудом под давлением. В схеме *и* внутрибарабанный циклон при его коррозии может выходить из строя, однако это не влечет

Таблица 7-4

Свойства отдельных типов сепараторов

Тип сепаратора	Положительные свойства	Отрицательные свойства	Особенности работы
Объемный	Простота конструкции, малое сопротивление, применимость для котлов всех параметров	Ограниченная нагрузка объема; применимость при котловой воде с ограниченным солесодержанием	Применяется без исключения во всех барабанных котлах
Жалюзийный	Высокая эффективность при легких условиях воднохимического режима; способствует лучшей организации парового объема	Большая металлоемкость; необходимость установки дополнительных сепараторов; повышенная коррозия	Высокая эффективность при капельном уносе
Массообменный	Улавливание растворенных в паре веществ; подогрев питательной воды	Громоздкость исполнения; потребность в чистой питательной воде	В основном для котлов высокого давления
Центробежный	Высокая эффективность при тяжелых условиях воднохимического режима; способность к работе при недостаточно деаэрированной воде	Громоздкость исполнения; высокое гидравлическое сопротивление; концентрированный вывод пара	Наиболее эффективные сепараторы для гашения пены

за собой таких тяжелых последствий, как разрыв сосудов под давлением.

Из приведенного обзора следует, что выбор надлежащего массообменного сепаратора для конкретных обстоятельств представляет достаточно сложную задачу. Неправильно выполненные массообменные устройства (особенно у котлов устаревших типов, что характерно для промышленной энергетики) обуславливают снижение экономичности, а в отдельных случаях и эксплуатационной надежности котлов.

При наладке внутрикотловых процессов необходимо анализировать соответствие установленных массообменных устройств имеющейся сумме эксплуатационных и конструктивных данных.

Центробежные сепараторы следует применять для котловой воды высокого солесодержания и одновременно высоких нагрузках паровых объемов. В тех случаях, когда ожидается появление устойчивой пены, циклоны имеют наибольшую эффективность.

В табл. 7-4 приведены данные о положительных и отрицательных свойствах, а также особенностях работы сепараторов различных типов, из которой видно, что для котлов среднего и низкого давления желательно применение центробежных сепараторов, имеющих небольшое сопротивление.

Как видно из табл. 7-4, для каждого конкретного комплекса условий оптимальным является вполне определенный тип сепаратора либо сочетание нескольких типов.

Глава восьмая

КЛАССИФИКАЦИЯ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

8-1. ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ

Для выбора оптимальных решений при проектировании в каждом конкретном случае требуется выявить основные критерии, характеризующие сущность процесса разделения пара и воды. На этой основе можно создать схему классификации, включающую основные признаки типов сепараторов и их конструктивных особенностей. Это позволит составить групповые характеристи-

ки сепараторов, объединенные по наиболее существенным показателям.

Попытки классифицировать многочисленные конструктивные решения сепарационных устройств, получивших распространение в паровой технике, предпринимались и раньше, например была разработана классификация схем включения объемных сепараторов многобарабанных котлов. Давались также частные решения при классификации схем включения центробежных и объемных сепараторов [Л. 39]. Однако все эти попытки не ставили своей целью создание всеобъемлющей классификации схем включения сепарационных устройств всех типов.

Отсутствие единой и общепризнанной методики оценки различных сепарационных устройств привело к тому, что в этом направлении работают отдельные группы специалистов, слабо связанные между собой. Разработка ряда решений, в значительной степени повторяющих друг друга, тормозит развитие науки о сепарации пара и воды.

Большое количество накопленных экспериментальных данных сделало возможной и настоятельно необходимой их систематизацию для организованного поиска методов решения задач сепарации пара в котлах.

Ниже приводится разработанная автором классификация схем включения различных типов сепараторов.

Для классификации схем включения сепараторов основным их типам присвоены следующие цифровые обозначения:

Типы сепараторов	Цифровые обозначения
Объемные	0
Поверхностные	1
Массообменные	2
Центробежные	3

С целью упрощения приняты одинаковые обозначения как внутрибарабанных, так и выносных сепараторов одного и того же типа. Например, выносные и внутрибарабанные циклоны обозначены цифрой 3.

В технологическом процессе сепарации возможно как последовательное, так и параллельное расположение различных сепараторов. Рассмотрим вначале последовательное включение сепараторов, составив таблицу схем включения возможных вариантов, состоящих из цифр

Схемы включения различных сепараторов

Число элементов в группе	Группы сепараторов															
	Наименование типов сепараторов и их цифровые обозначения															
	Объемные—0				Поверхностные—1				Массообменные—2				Центробежные—3			
1	0				1				2				3			
2	00	01	02	03	10	11	12	13	20	21	22	23	30	31	32	33
3	000	001	002	003	100	101	102	103	200	201	202	203	300	301	302	303
	010	011	012	013	110	111	112	113	210	211	212	213	310	311	312	313
	020	021	022	023	120	121	122	123	220	221	222	223	320	321	322	323
	030	031	032	033	130	131	132	133	230	231	232	233	330	331	332	333

0, 1, 2, 3 (табл. 8-1) для одного, двух и трех последовательно включенных сепараторов.

Все многообразие схем разделено на четыре основные группы 0, 1, 2, 3, в зависимости от типа первого по ходу пара сепаратора.

Таблица 8-1 показывает, что возможное число вариантов включения быстро растет с увеличением числа последовательно включенных сепараторов. Общее число вариантов x при числе рассматриваемых типов сепараторов $a=4$ можно определить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a^1 = 4^1 = 4, & \Sigma x_1 &= 4; \\ x_2 &= a^2 = 4^2 = 16, & \Sigma x_{1-2} &= 20; \\ x_3 &= a^3 = 4^3 = 64, & \Sigma x_{1-3} &= 84; \\ x_4 &= a^4 = 4^4 = 256, & \Sigma x_{1-4} &= 340; \\ x_5 &= a^5 = 4^5 = 1024, & \Sigma x_{1-5} &= 1364. \end{aligned} \right\} \quad (8-1)$$

При $n=7$ $x_7=20\,000$ вариантов. Очевидно, что без систематизации не представляется возможным рассмотреть все эти многочисленные варианты.

8-2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ

Группа «0». В эту группу входят схемы сепарационных устройств, в которых первым по ходу пара является объемный сепаратор. Все схемы группы «0» создают

незначительное гидравлическое сопротивление для циркуляционных контуров, поскольку первичная грубая сепарация основной массы циркулирующей воды и пара происходит в объеме. После первичной, грубой сепарации влажный пар можно направлять для более тонкой сепарации в любой сепаратор, включая циклон. Но и

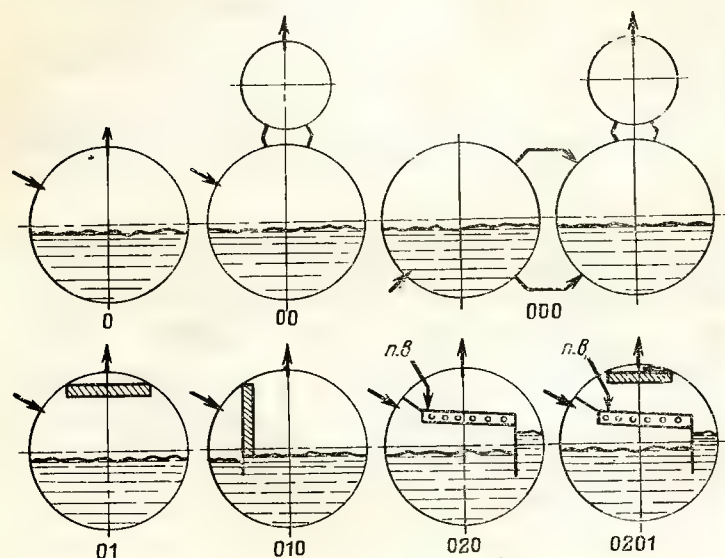


Рис. 8-1. Схемы группы «0».

0 — барабан; 00 — барабан с сухопарником; 000 — трехбарабанный котел с сухопарником; 01 — барабан с выходным жалюзи; 010 — барабан с промежуточными жалюзи; 020 — барабан с промежуточным массообменным сепаратором; 0201 — то же с выходным жалюзийным сепаратором.

при этом сопротивление возрастает незначительно ввиду уменьшения плотности сепарируемой смеси.

Рассмотрим различные варианты схем группы «0» (рис. 8-1).

Схема 0 — первая, опробованная в паровой технике схема — объем барабана без каких-либо сепарирующих устройств (рис. 8-1, 0). Эта схема обеспечивает получение пара хорошего качества при сравнительно невысокой нагрузке парового объема.

Схемы 00 и 000 (рис. 8-1, 00, 000) представляют собой последовательно включенные паровые объемы.

Обе эти схемы были широко распространены, но в настоящее время они заменены более эффективными. Оказалось более целесообразным изготавливать один барабан вместо двух-трех.

Схема 01 (рис. 8-1, 01). По этой схеме жалюзи устанавливают на выходе пара из барабана и используется энергия избыточного давления пара в барабане. Схема оказалась эффективной в работе при солесодержании котловой воды до 1000 мг/кг. При снижении нагрузки парового объема солесодержание котловой воды можно увеличить до 3000 мг/кг (например, котлы ДКВР-10/13).

Схема 010 (рис. 8-1, 010). В этой схеме грубая сепарация производится в малом паровом объеме, гашение кинетической энергии и промежуточная сепарация — в жалюзи, окончательная сепарация — в основном паровом объеме. Такие сепараторы установлены на многих котлах среднего давления, преимущественно в чистых отсеках, поскольку солесодержание котловой воды этих отсеков обычно не превышает 1000 мг/л.

Схемы 02, 020 (рис. 8-1, 020). Схема 02 не опробована; известна лишь схема 020, в которой на входе имеется объемный, в промежутке — массообменный и в качестве выходного — объемный сепаратор. Широко применяется схема 0201, хорошо зарекомендовавшая себя в котлах высокого давления.

Схемы 03, 030 (рис. 8-2). Схема 03 известна как с внутрибарабанными, так и с выносными циклонами. Грубая сепарация производится в объеме барабана, а тонкая — в циклоне. Такие схемы успешно применяют в промышленных котлах, поскольку они позволяют работать с высоким солесодержанием как котловой, так и питательной воды. Схемы 03, несомненно, представляют интерес для серийных промышленных котлов среднего давления, эксплуатируемых при весьма разнообразных условиях воднохимического режима.

В настоящее время по схеме 03 работают судовые котлы речного флота (улитка проф. Шелеста) [Л. 12], котлы ДКВР-10/13 [Л. 39], котлы ШБ-А5 [Л. 40], котлы Шухова пятибарабанные [Л. 41], котел ШБ-А7 [Л. 42]. Котлы работают при солесодержании котловой воды в пределах 3000 мг/кг, влажность пара в пределах 1%.

Схема 030 не опробована, но должна обладать малым гидравлическим сопротивлением, хотя циклоны и питаются энергией циркуляционных контуров; без дополнительных элементов сепарации она не опробована.

Из более сложных схем возможно применение 0301 и 0310. Обе схемы должны быть работоспособны при высоком солесодержании котловой воды.

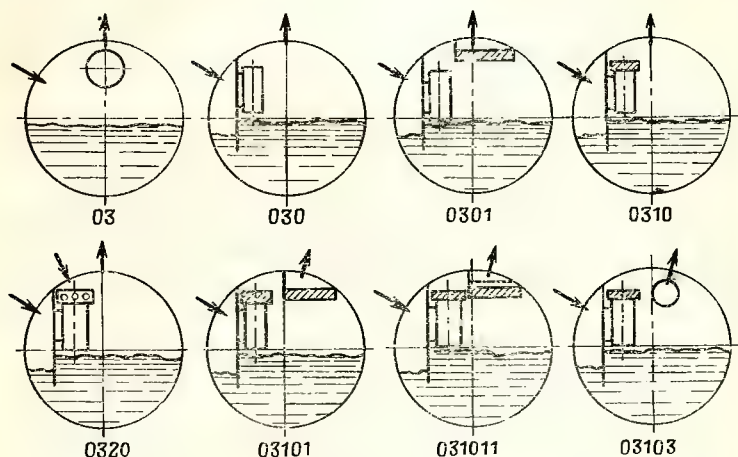


Рис. 8-2. Схемы группы «0» с центробежными сепараторами.

03 — объемный сепаратор с циклоном на выходе; 030 — объемный сепаратор с циклоном в промежутке; 0301 — объемный сепаратор с циклонами в промежутке и жалюзи на выходе; 0310 — объемный сепаратор с промежуточными циклонами и жалюзи; 0320 — объемный сепаратор с промежуточными циклонами и массообменными сепараторами; 03101 — объемный сепаратор с промежуточными циклонами и жалюзи и с жалюзийным на выходе; 031011 — то же с двойным жалюзийным на выходе; 03103 — объемный сепаратор с циклонами и жалюзи в промежутке и циклонами на выходе.

Схема 0320 представляет интерес в случае применения питательной воды повышенного солесодержания. На циклонах установлены массообменные сепараторы, а циркулирующая в контурах котловая вода в основном проходит мимо циклонов. Следовательно, в циклонах возможно создание благоприятных условий для разрушения пены.

Схема 03101 в несколько измененном виде опробована на котлах СУ-9/39 [Л. 43]. Солесодержание котловой воды 10 000 мг/кг при солесодержании питательной воды 1 000 мг/кг. Влажность пара 0,01%.

Схема 031011 опробована на котле ГМ-50-1. По условиям производства на Вахском азотно-туковом заводе давление пара в барабанах котлов было снижено с 44 до 19 кгс/см². При тяжелых условиях воднохимического режима (солесодержание питательной воды 500—700 мг/кг) котлы на пониженном давлении пара и при заводских сепарационных устройствах (схема 31011) выдавали пар нормального качества лишь до производительности 25 т/ч (при расчетной 50 т/ч). После установки на этих котлах схемы 031011 их производительность повысилась до 40 т/ч, а при установке схемы 03103 — до 50 т/ч [Л. 31].

Все схемы группы «0» обладают одним общим свойством — малым гидравлическим сопротивлением для контуров циркуляции, что делает эту группу весьма перспективной не только для промышленных котлов, но и для котлов электростанций, поскольку улучшение циркуляционных характеристик контуров путем снижения гидравлического сопротивления сепараторов является достаточно актуальной задачей.

Группа «1». Основным характерным признаком группы «1» является включение жалюзийного сепаратора первым по ходу сепарируемой пароводяной смеси.

Схема 1 с вынесенным сепаратором известна давно (рис. 8-3, 1), однако в настоящее время для сепарации пара ее применяют редко (линейные сепараторы пленочного типа иногда применяют для очистки конденсата). Схема 1 с сепаратором внутри барабана пока не предложена. Заполнение всего парового пространства жалюзиями, может быть, и имеет смысл, особенно для воды с малым солесодержанием, но повышенный расход

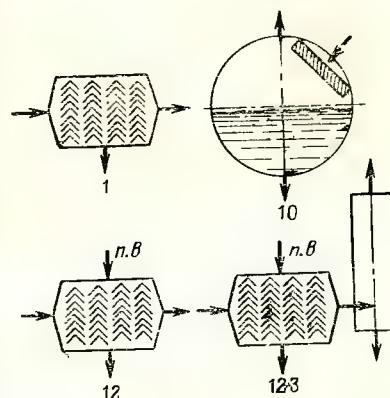


Рис. 8-3. Схемы группы «1».

1 — единый жалюзийный сепаратор; 10 — входной жалюзийный сепаратор с последующим объемным сепаратором; 12 — совмещенный жалюзийно-массообменный сепаратор; 123 — совмещенный жалюзийно-массообменный сепаратор с выходным циклоном.

металла и ряд других отрицательных свойств делают эту схему мало перспективной.

Схема 10 (рис. 8-3, 10) также не получила распространения, хотя в этом случае обеспечивается надежное гашение кинетической энергии струй пара на входе в паровой объем.

Включение жалюзи по схеме 10 применяют на входе в объем барабана чистого пара. Гидравлическое сопротивление даже при пропуске всей циркулирующей смеси через жалюзи может быть невысокое. Представляет интерес опробовать эту схему для котлов, работающих на питательной воде с малым содержанием.

Схема 12 (рис. 8-3), состоящая из линейного жалюзийного сепаратора, омываемого питательной водой, может быть применена в прямоточных котлах. Сходное устройство применено в прямоточных котлах «Зульцер» (рис. 8-3, 123). В отечественной энергетике подобные схемы распространения не получили.

Часть схем группы 1 в табл. 8-1, является нецелесообразной, но для рассмотрения всех возможных вариантов расположение в таблице сепарационных схем в определенном порядке является очень удобным. Анализа всех возможных вариантов проводить не требуется, поскольку эта группа сепараторов имеет много общих свойств, которые в той или иной степени присущи рассмотренным вариантам.

Подводя итог краткому обзору схем группы «1», можно отметить, что эти схемы, обладая рядом положительных свойств (малое гидравлическое сопротивление, высокая степень очистки при легких водных условиях), получили распространение лишь в некоторых типах сепараторных прямоточных котлов. Возможно и целесообразно расширение области применения схем этой группы на барабанные котлы.

Группа «2». Схемы группы «2» характеризуются тем, что первым сепарирующим элементом по ходу пароводяной смеси является массообменный сепаратор.

Схему 2 (рис. 8-4) можно применять в качестве линейного сепаратора для прямоточных котлов.

Схемы 20 и 201 также можно применять в прямоточных котлах при малом содержании промывочной воды и конденсатном режиме, исключая образование устойчивой пены.

Схемы 23 и 223 можно применить в прямоточных котлах докритического давления. Схема 23 применяется при промывке пара в выносных циклонах. Возможны более сложные схемы группы «2» (например, 223).

Сепарационные устройства, в которых первым по ходу среды, подлежащей разделению, устанавливается массообменный сепаратор, распространены недостаточно широко. В ряде случаев эти устройства имеют заметные преимущества: малое сопротивление для контуров, простота и надежность конструкции; их применяют с расположением массообменного сепаратора как внутри, так и вне барабана. Массообменный сепаратор в качестве первичного разделителя способствует гашению кинетической энергии потоков пароводяной смеси и организует работу сепарационного объема.

Группа «3» (рис. 8-5). Схема 3 применяется лишь при установке выносных циклонов — безбарабанные котлы [Л. 44], а также выносных циклонов, выдающих пар помимо барабанов. Ввиду малой металлоемкости безбарабанные котлы дешевле котлов с барабанами.

Схема 30 — широко распространена в станционной энергетике. Применяется как с выносными, так и с внутрибарабанными циклонами. По этой схеме в настоящее время работает много энергетических котлов среднего и высокого давления. Схема эффективна при тяжелых условиях воднохимического режима и часто применяется в солевых отсеках котлов. К недостаткам

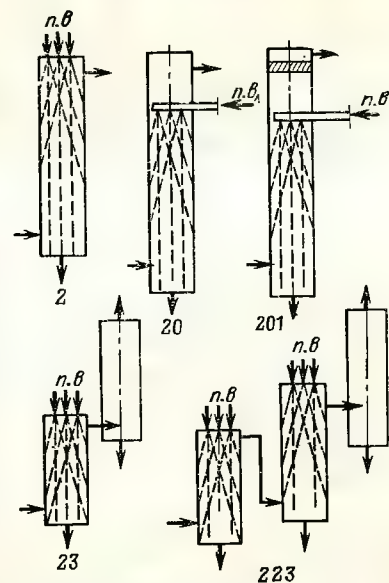


Рис. 8-4. Схемы сепараторов группы «2».

2 — единый массообменный; 20 — входной массообменный с объемом на выходе; 201 — входной массообменный с объемом и жалюзи на выходе; 23 — входной массообменный с циклоном на выходе; 223 — двойной массообменный с циклоном на выходе.

схемы 30 можно отнести повышенное гидравлическое сопротивление для контуров циркуляции, что ограничивает область их применения на котлах с малым движущим напором циркуляционных контуров. В последнее время получила широкое распространение схема 310, более эффективная, чем 30. Схема 320 известна лишь из

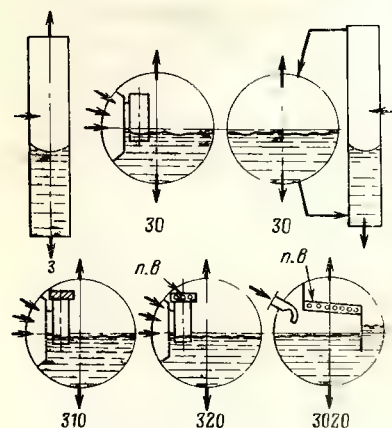


Рис. 8-5. Схемы группы «З».

3 — единый циклон; 30 — входной внутрибарабанный циклон с объемом на выходе; 30 — входной выносной циклон с объемом на выходе; 310 — входной внутрибарабанный циклон с жалюзийным промежуточным сепаратором и объемом на выходе; 320 — входной внутрибарабанный циклон с массообменом в промежутке и объемом на выходе; 3020 — входной циклон с промежуточными объемным и массообменным сепараторами и объемом на выходе.

гидравлической характеристикой применяют на малых котлах [Л. 38].

Одним из важных принципиальных отличий схем группы «З» является возможность сепарации пузырьков пара из котловой воды, что представляет тем больший интерес, чем выше давление.

В данном кратком обзоре возможных вариантов сепарационных устройств не рассмотрены схемы с пятью-шестью-семью и более элементами, хотя именно такие варианты могут обладать наиболее существенными преимуществами.

авторского свидетельства [Л. 45] и обладает большим гидравлическим сопротивлением, чем схема 30. Эта схема известна и с выносными циклонами, с подачей пара из выносных циклонов под уровень воды в барабане. При такой схеме создается чрезмерное понижение уровня в циклонах, приводящее к циркуляционным авариям [Л. 46].

Для выносных циклонов также разработаны конструкции устройств, в которых сопротивление ввода пароводяной смеси сведено до минимума и не превышает 1000 кгс/м^2 (в то время как улитки сложной конфигурации имеют сопротивление до 10000 кгс/м^2). Выносные циклоны с улучшенной ги-

8-3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Для более точной оценки работы сложных сепарационных устройств кроме рассмотренных выше схем классификации целесообразно применять более наглядные — структурные схемы. Сущность таких схем заключается в том, что кроме типов сепараторов, обозначаемых теми же цифрами, что и в схемах класси-

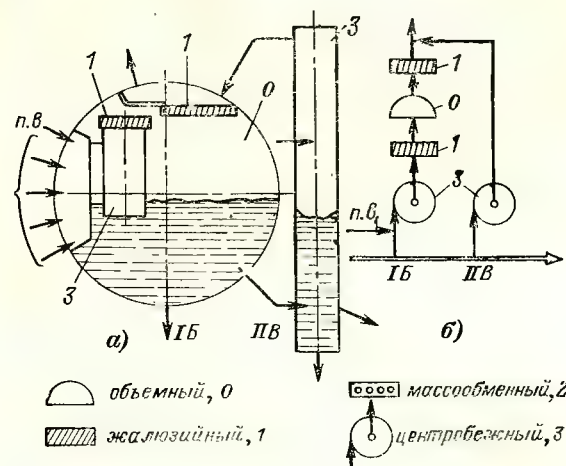


Рис. 8-6. Конструктивная и структурная схемы сепарационных устройств котла со ступенчатым испарением.

а — конструктивная схема ступенчатого испарения; б — структурная схема ступенчатого испарения

кации, наносится также структура потоков пара и воды в котлах. Поток воды обозначается двойной линией, пара — одинарной; буквами Б обозначены внутрибарабанные устройства, буквами В — выносные. Так, например, на рис. 8-6 изображены распространенные сепарационные устройства для энергетических котлов среднего давления, оборудованных ступенчатым испарением. Отсеки ступенчатого испарения можно обозначить римскими цифрами I, II, III. Структурные схемы позволяют проводить анализ эффективности работы различных сепарационных устройств. С целью учета конструктивных осо-

бенностей сепараторов в структурных схемах указывают основные характеристики каждого из них.

Объемные сепараторы в зависимости от направления движения сепарируемого пара подразделяют на восходящие — В, горизонтальные — Г, нисходящие — Н, смешанные — С (рис. 8-7).

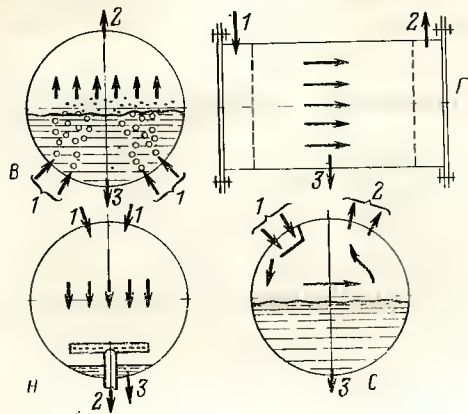


Рис. 8-7. Объемные сепараторы с различными потоками пара.

В — вертикальный восходящий; Г — горизонтальный; Н — вертикальный нисходящий; С — смешанный; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды.

Жалюзийные сепараторы в зависимости от их конструкции обозначают: дроссельные — Др, поворотные — П, лабиринтные — Л, ударные — У, комбинированные — К (рис. 4-1).

Массообменные сепараторы в зависимости от принципа массообмена обозначают: струйные — Стр (рис. 5-2), объемные — Об (рис. 5-1), барботажные — Барб (рис. 5-3), центробежные — Цб (рис. 6-8).

Каждый из массообменных сепараторов может быть выполнен поднятым и погруженным; во многих случаях можно применять комбинацию из массообменных и центробежных сепараторов.

Центробежные сепараторы в зависимости от типа обозначают (рис. 8-8): радиальные — Р, радиально-осевые — Р-О, осевые — О.

С обозначением типов сепараторов и их конструкции структурные схемы сепарационных устройств становятся более полными.

8-4. СОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

После выбора требуемых типов сепараторов составляют структурную схему. Пример такой схемы показан на рис. 8-6, б. В ее левой части изображены внутрибарабанные устройства чистого отсека ИБ. Первыми по ходу пароводяной смеси включены внутрибарабанные циклоны 3. В них же подается питательная вода. На выходе из циклонов установлены жалюзи 1. Затем пар проходит паровой объем 0 и еще раз жалюзи 1 на выходе из барабана.

Пар из выносного циклона солевого отсека ПВ поступает без дополнительной сепарации за жалюзи. Сравнение конструктивной схемы со структурной показывает, что они дополняют друг друга. В структурной схеме не показан путь отсепарированной влаги, однако для барабанных котлов низкого и среднего давления этот недостаток малосуществен. На рис. 8-6, а видно, что пропуск всей пароводяной смеси через внутрибарабанные циклоны нецелесообразен. В качестве мероприятия для улучшения работы внутрибарабанных циклонов неоднократно осуществлялся отвод основной части циркулирующей воды помимо циклонов в водяной объем барабанов.

В этом случае устраняется пульсация уровней воды в барабанах, снижается гидравлическое сопротивление

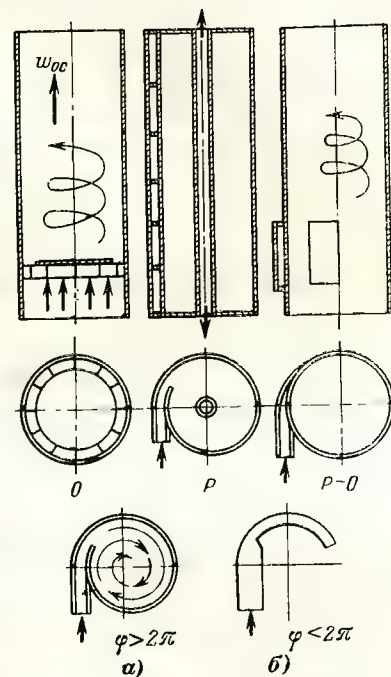


Рис. 8-8. Типы циклонов.

О — осевой; Р — радиальный; Р-О — радиально-осевой; а — замкнутая траектория; б — незамкнутая траектория.

внутрибарабанных устройств для контуров циркуляции (замена схем группы «З» группой «0»), предотвращается опасность скопления шлама в глухих коробах. Уровень котловой воды в циклонах понижается, что улучшает их работу.

Такое мероприятие для котлов низкого и среднего давления не опасно ввиду большой разницы плотностей пара и воды, что обеспечивает надежное выведение пузырьков пара из водяного объема.

Глава девятая

ТЕПЛОХИМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КОТЛОВ

9-1. ЗАДАЧИ И ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОХИМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Применительно к внутрикотловым процессам задачи наладочных работ и теплотехнических испытаний сводятся к следующему:

- 1) определение качества пара во всем диапазоне изменения нагрузки котла при нормальных размерах продувки; выявление максимальной нагрузки котла;
- 2) определение предельного солевого содержания котловой воды;
- 3) оценка гидродинамики в паропрообразующих и пароперегревающих трубах и отсутствия повреждений экономайзерных, экранных и перегревателей труб;
- 4) поддержание положения уровней в барабанах, отсеках и выносах циклонов и контроль за работой автоматов питания;
- 5) поддержание температуры перегретого пара и контроль за работой регулятора перегрева.

Весь комплекс испытаний можно подразделить на следующие два этапа: I серия теплотехнических испытаний; II серия теплотехнических испытаний после проведения наладочных мероприятий.

Особенностью, характеризующей условия испытаний, является малая наглядность внутрикотловых процессов. Существенных изменений в работе сепарационных устройств можно достигнуть мероприятиями, осуществляемыми в основном при остановках котла. Длительность остановки котлов часто бывает ограниченной из-за отсутствия достаточного парового резерва, потребности в остановках других котлов и ряда других обстоятельств (например, трудности организации широкого фронта работ в барабане), что и предопределяет своеобразие работ.

Примерный порядок выполнения отдельных мероприятий после проведения первой серии теплотехнических испытаний заключается в следующем:

1. Производят оценку эксплуатационных условий и конструктивных особенностей котла.
2. Составляют расчет нескольких вариантов переделок внутрикотловых устройств, на основе которого выбирают оптимальный вариант, обеспечивающий достаточно надежное повышение эффек-

тивности работы котлов и наиболее легкое выполнение переделок с минимальным количеством сверлений барабана и других особо трудоемких работ.

3. Составляют рабочий график производства работ.
4. Изготавливают детали и собирают их вне барабана.
5. Демонтируют имеющиеся сепараторы и монтируют новые сепарационные устройства.

Изготовление деталей проводится большей частью на местах в механических мастерских. Подгонку и сопряжение деталей производят на монтажных площадках. Все выявленные при этом дефекты устраняют.

Для сохранения намеченного порядка монтажа элементов в барабане их маркируют. Маркировку деталей несложных устройств можно проводить мелом, при сложных сепарационных устройствах лучше применять несмываемую маркировку, наносимую электродуговой сваркой.

Поскольку эффективность проводимых мероприятий заранее неизвестна, то демонтаж сепараторов надо проводить аккуратно, без порчи деталей, и демонтированные детали сохранять до тех пор, пока будут опробованы вновь установленные устройства и выявлена хорошая работа новых сепараторов.

Все элементы нужно собирать и складывать поблизости от котла.

С целью уменьшения длительности переделок работу в барабане производят круглые сутки. В каждую смену назначают три — шесть человек.

После выполнения намеченных переделок проводят вторую серию теплотехнических испытаний котлов. Сравнение данных обеих серий испытаний показывает результаты проведенных работ, что позволяет подсчитать полученный экономический эффект. Обе серии испытаний должны проводиться при одной и той же схеме контроля и одинаковой методике измерений.

После окончания работ составляют технический отчет, в котором отмечают основные этапы и эффективность проведенной наладки.

9-2. ВИДЫ ТЕПЛОХИМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОТЛОВ

Качество вырабатываемого барабанными котлами пара, как правило, характеризуется тем, что чем меньше производительность котла и солевое содержание котловой воды, тем оно выше. Однако снижение производительности котла и увеличение продувки нежелательны.

Основными задачами теплотехнических испытаний являются:

- 1) определение максимально допускаемой по качеству пара производительности котла;
- 2) определение качества пара котла при различных нагрузках;
- 3) выявление влияния солевого содержания котловой воды на качество пара;
- 4) определение влияния положения уровня воды в барабане котла на качество пара;
- 5) установление норм воднохимического режима работы котла.

Кроме основных, часто требуется решать дополнительные задачи, выявить влияние тепловых перекосов и срывов давления, определить качество пара по ступеням, а также влияние степени кипения в водяном экономайзере и т. п. В общем случае задачей теплотехнических испытаний является экспериментальное определение гра-

ниц надежной и экономичной работы котла по условиям водно-химического режима.

В процессе теплехимических испытаний определяют зависимость уровня воды по отсекам от производительности котла, а также отдельные вопросы циркуляции.

В зависимости от объема экспериментальной части, а также требуемой точности измерений различают следующие виды теплехимических испытаний:

контрольное испытание котла для определения качества пара; теплехимическое испытание котла; расширенное теплехимическое испытание котла.

Контрольное испытание котла производится при эксплуатационных режимах. Определяют производительность котла, давление пара, уровень воды, солесодержание или щелочность пара и котловой воды.

Теплехимическое испытание котла предусматривает специальную его подготовку и охватывает более широкий диапазон исследований.

Для этого монтируют схему контроля, причем часть пробоотборных точек используется лишь во время испытаний. Полученные данные должны позволить построить следующие три функциональные зависимости

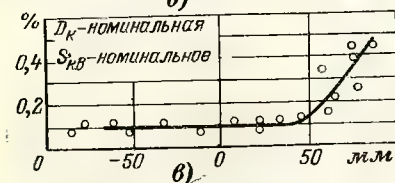
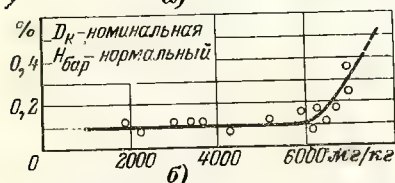
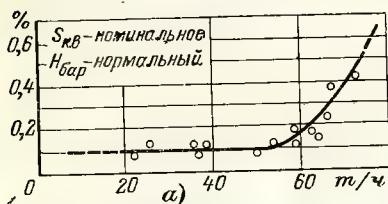


Рис. 9-1. Функциональные графики.

а — зависимость солесодержания пара от производительности котла; б — зависимость солесодержания пара от солесодержания котловой воды; в — зависимость солесодержания пара от уровня воды в барабане.

и уровней по отсекам, скорость воды и пара в отдельных трубах.

Для повышения точности измерений параллельно имеющимся эксплуатационным приборам на время испытаний устанавливают

также более точные приборы, увеличивают число опытов, их продолжительность, а также применяют уточненные методы анализов качества пара.

Расширенное теплехимическое испытание котла проводят в особо ответственных случаях, когда требуется всесторонняя проверка, например головных экземпляров котлов со сложными схемами сепарации. В этих случаях проводится широкий диапазон исследований элементов воднохимического режима котла на многих параметрах. Обычно предусматривается несколько серий испытаний с проведением наладки сепарационных устройств.

Расширенные теплехимические испытания котлов являются весьма трудоемкими, поэтому их организуют лишь в случаях особой необходимости при обязательном участии специализированных организаций.

Задачей этих испытаний является получение полной картины работы сепарационных схем котла в широком диапазоне изменения нагрузки при различных эксплуатационных условиях. В ряде случаев приходится искусственно создавать различный воднохимический режим.

Кроме указанных трех видов теплехимических испытаний, отличающихся друг от друга объемом и точностью измерений, испытания различают еще по их назначению на пуско-наладочные и режимно-наладочные.

Пуско-наладочные испытания предусматривают в основном определение степени эксплуатационной надежности котлов.

Одним из наиболее характерных проявлений ненадежного воднохимического режима является перегор труб пароперегревателей. Основная причина — занос их солями. Поэтому наряду с проведением анализов качества пара контролируют его температуру в отдельных змеевиках и в общем паропроводе.

Режимно-наладочные испытания. Если при пуско-наладочных испытаниях основной задачей является достижение надежной эксплуатации котла, то при проведении режимно-наладочных испытаний главное внимание уделяется достижению высокого качества пара и повышению экономичности работы котла.

9-3. ПУСКО-НАЛАДОЧНЫЕ И РЕЖИМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Пуско-наладочные работы. После окончания монтажа нового котла или крупных переделок работающего котла требуется проводить пуско-наладочные испытания. Основной задачей пуско-наладочных испытаний в применении к внутрикотловым процессам можно считать получение достоверных данных об эксплуатационной надежности нового устройства в отношении циркуляции и качества пара при заданном воднохимическом режиме.

Ориентировочный порядок проведения испытаний при работах следующий:

1. Опыты при нагрузке котла 30—60% номинальной.
2. Подъем производительности котла до номинальной и проверка воднохимического режима работы котла.
3. Определение качества пара в диапазоне изменения нагрузки 30—100% номинальной.
4. Повышение солесодержания котловой воды до оптимальных значений, определяемых нормами продувки котла.

Влияние подрыва клапанов на разбежку уровней по отсекам (при выносных циклонах) проводится вначале при нагрузке котла не выше 50% номинальной. Кроме этого при пуско-наладочных испытаниях проверяют надежность работы схемы непрерывной и периодических продувок, схемы контроля качества пара и воды, работы водоуказательных устройств.

Надежность работы пароперегревателя определяется прежде всего по балансу солей на входе и выходе из него. Если общий перегрев значительно превышает расчетные паспортные значения, то необходимо принимать меры к его уменьшению. Кроме конструктивных факторов (соотношение поверхностей нагрева испаряющих и перегревающих элементов, расположение их) на температуру перегретого пара влияют и эксплуатационные факторы: с уменьшением температуры питательной воды температура перегретого пара возрастает, поскольку уменьшается количество образующегося пара. Увеличение избытка воздуха также повышает температуру перегретого пара из-за интенсификации теплообмена в конвективной части перегревателя.

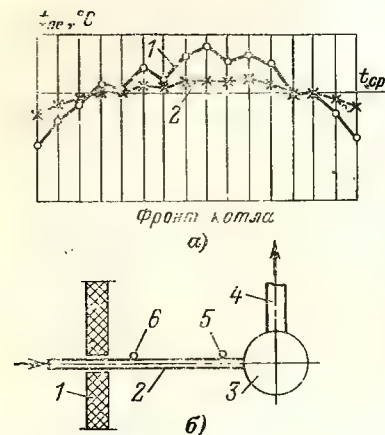


Рис. 9-2. Определения поля температур по ширине пароперегревателя.

а — температура пара по ширине котла; 1 — правильно замеренная температура пара по отдельным змеевикам; 2 — усредненные данные температуры вследствие неправильного расположения горячих спаев термодпар; б — размещение горячих спаев термодпар; 1 — обмуровка; 2 — змеевик перегревателя; 3 — паросборный коллектор; 4 — паростоводящая труба; 5 — неправильно установленный горячий спай (слишком близко к коллектору); 6 — правильно установленный горячий спай

из-за большой теплопроводности их стен, в результате чего возможно усреднение температуры.

Установка термодпар в обогреваемой зоне трудно выполнима. Для получения достоверных данных требуется организация надежного охлаждения электродов термодпар при сохранении неизменным теплового потока к исследуемому змеевику.

Правильная установка термодпар в необогреваемой зоне обеспечивает небольшое расхождение измеряемых температур стенки и движущегося в змеевиках пара.

Качество насыщенного и перегретого пара при пуско-наладочных испытаниях целесообразно проверять по лабораторному, а еще

лучше — по регистрирующему солемеру. Регистрирующие солемеры надежно фиксируют резкие ухудшения качества пара.

Для котлов, оборудованных ступенчатым испарением, необходимо с момента растопки измерять положение уровня воды по отсекам, поскольку в результате просчетов или ошибок при монтаже возможно чрезмерное понижение уровня воды как в выносных, так и во внутрибарабанных отсеках. Опасные понижения уровней могут иметь место во время периодических продувок. Перед пуском котла желательно провести поверочный расчет уровней воды в отсеках.

Граница опасного понижения уровней должна быть определена заранее, с тем чтобы быстро принимать меры в процессе испытаний, например сбросить нагрузку, если в этом появится необходимость. В схемах ступенчатого испарения, в которых пар из циклонов подается в паросборник помимо барабана, при неправильной установке предохранительных клапанов в случае подрыва их возможно дополнительное снижение уровней в циклонах.

Это происходит вследствие того, что сопротивление от барабана до паросборника в момент подрыва клапанов резко уменьшается из-за перепуска значительной части пара помимо паросборного коллектора, что и обуславливает нарушение равновесия. Аналогичные действия оказывают другие отборы пара из барабана, например на собственные нужды.

Устранить это нежелательное явление возможно двумя способами: переносом на паросборный коллектор предохранительных клапанов и всех линий отборов насыщенного пара, либо уменьшением сопротивления пароперепусков настолько, что колебания уровней станут незначительными; это устранил опасность упусков.

Основную часть крупных дефектов устраняют в начале пуско-наладочных испытаний, по мере их выявления (например, перенос клапанов, установка дроссельных шайб на линиях периодической продувки); устранение мелких недоделок можно перенести на период текущих ремонтов либо капитального ремонта.

Завершающим этапом проведения комплекса пуско-наладочных испытаний является непрерывная работа котла при полной нагрузке в течение 72 ч.

Обычно пуско-наладочные испытания проводят комплексной бригадой в составе специалистов водников и топчи́ков. На топчи́ков возлагают наблюдение за процессами горения и работой вращающихся механизмов.

Между специалистами поддерживается взаимная информация, что является обязательным условием безаварийных пусков котлов.

После окончания трехсуточных опытов и обработки материалов испытаний составляется технический акт, подписываемый представителями организации, проводящей пуск, и работниками эксплуатации, а также карта воднохимического режима (табл. 9-1).

В результате ряда причин в эксплуатации происходят отклонения параметров работы котла от номинальных значений.

В котлах промышленной энергетики часто снижают давление пара в барабане котлов в соответствии с требованиями основного производства; солесодержание питательной воды превышает номинальные расчетные значения. Нагрузка котла также не всегда бывает стабильной.

Все эти отклонения ухудшают работу сепарационных устройств и снижают качество вырабатываемого пара.

Карта воднохимического режима и график химконтроля
в котельной завода

Наименование отбираемых проб	Периодич- ность отбирае- мых проб	Компонент контроля		Норма жест- кости, мг-экв/кг	Норма щелочно- сти, мг-экв/кг
		Жест- кость	Щелоч- ность		
Сырая вода	Раз в 10 дней	+	+	Не норми- руется	Не нормируется
Химически очи- щенная вода	Через 3 ча- са*	+	—	Не выше 0,02	Не выше ще- лочности сырой воды
Конденсат	Через 1 час	+	+	Не выше 0,02	В пределах 0,2—0,3
Котловая вода	Через 2 часа	—	+	—	$\text{Щ}_{\text{кв}} = 15 \text{Щ}_{\text{тв}}$
Насыщенный пар	Через 2 часа	—	+	—	0,1—0,15

* При выходе фильтра из работы анализы производят через 10—15 минут.

Примечание. Знак „+“ — анализ производить, знак „—“ — анализ не про-
изводить.

Режимно-наладочные испытания. Для выявления влияния как конструктивных, так и эксплуатационных факторов на работу сепарационных устройств котла проводят комплекс режимно-наладочных испытаний. Как правило, средствами эксплуатационного контроля повышение эффективности работы сепарационных устройств определяется достаточно надежно по следующим признакам: занос пароперегревателей и турбин, ограничение нагрузки котлов, повышенная интенсивность отложения вторичной накипи и др.

Вследствие этого I серию испытаний при выполнении пуско-режимных наладочных работ обычно проводят сравнительно короткой, так как существенные дефекты в работе сепарационных устройств определяются достаточно быстро и надежно.

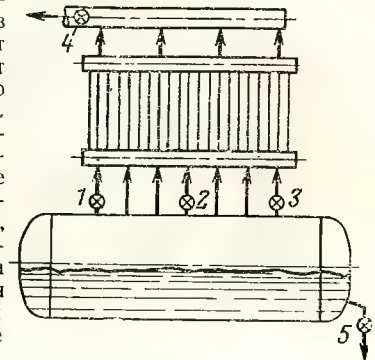
Однако в отдельных случаях истинные причины неполадок в работе котла бывает трудно определить. Это относится главным образом к небольшим, трудно обнаруживаемым, дефектам: местный занос солями отдельных змеевиков пароперегревателя, небольшое ухудшение условий циркуляции, при котором еще не происходит циркуляционных аварий, но наблюдается интенсивное отложение железокисных накипей вследствие малой кратности циркуляции и небольшой скорости воды в трубах.

В каждом конкретном случае требуется тщательная проектная разработка необходимой модернизации отдельных узлов котла (возможно выполнение эскизного проекта). Далее изготавливают требуемые детали, а затем проводят переделки на котле.

II серия тепlohимических испытаний, осуществляемая после некоторых переделок либо изменений режима эксплуатации, проводится в сравнительно сжатые сроки, но в полном объеме.

При этом предполагается, что подготовка схемы контроля качества пара и воды проведена ранее, при выполнении I серии испытаний. Для наглядности полученных результатов испытаний желательнее оставить без изменения схему контроля и методику измерений.

Подводя итог рассмотрению вопросов о проведении тепlohимических испытаний, можно сделать следующие обобщения: комплекс наладочных работ включает две серии испытаний: до и после выполненных переделок. Каждое из этих испытаний в зависимости от требуемого объема работ может быть контрольным (на качество пара), простым и расширенным. Каждое испытание должно включать прикидочные, основные и резервные опыты. Если испытание проводится после значительных переделок сепарационных устройств, необходимы пуско-наладочные испытания; после работы котла с установленными сепарационными устройствами длительное время проводятся режимно-наладочные испытания.

9-4. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАРА
И ВОДЫ

В эксплуатации воднохимический режим работы котлов ведется на основании систематических наблюдений за качеством пара и воды. Для этого на каждом котле обычно имеется одна — три точки отбора проб пара и столько же точек отбора котловой и питательной воды.

Для тепlohимических испытаний эксплуатационных точек отбора оказывается недостаточно — в зависимости от предполагаемого объема анализов и типа котла разрабатывается схема контроля. Часто эту схему разрабатывают совместно с разработкой сепарационных устройств.

Сравнительно несложны схемы контроля у котлов небольшой мощности без ступенчатого испарения. В этих случаях имеются 1—3 точки отбора проб котловой воды, из которых одна из продукционной линии, а остальные из водяного объема котла: для отбора проб насыщенного пара две-три точки по ширине барабана, а для перегретого пара — одна точка (рис. 9-3).

Для котлов со ступенчатым испарением схемы контроля значительно усложняются (рис. 9-4). Общее число точек отбора проб достигает десяти и более. Эти схемы контроля дают возможность провести подробный анализ работы котла и выявить места ухудшения качества пара.

Для конденсации и охлаждения проб пара, а также для охлаждения проб воды применяют холодильники различных конструкций. В качестве охлаждающего реагента используется техническая вода (обычно не умягченная), реже — окружающий воздух.

Рис. 9-3. Схема контроля
качества пара и воды
для котла без ступенча-
того испарения.

1, 2, 3 — насыщенный пар;
4 — перегретый пар; 5 — кот-
ловая вода.

Водяные холодильники бывают змеевиковыми и прямоточными, на одну или несколько точек отбора проб. Как в змеевиковых, так и в прямоточных холодильниках регулирование расхода ведется вентилями, включенными на выходе пробы. При таком расположении вентилей давление в пробопроводящих трубах больше, чем в водяном объеме холодильника, что исключает искажение проб при неплотных трубках. Для сконденсированных проб пара иногда делают отдельный дренаж, с тем чтобы собирать и использовать конден-

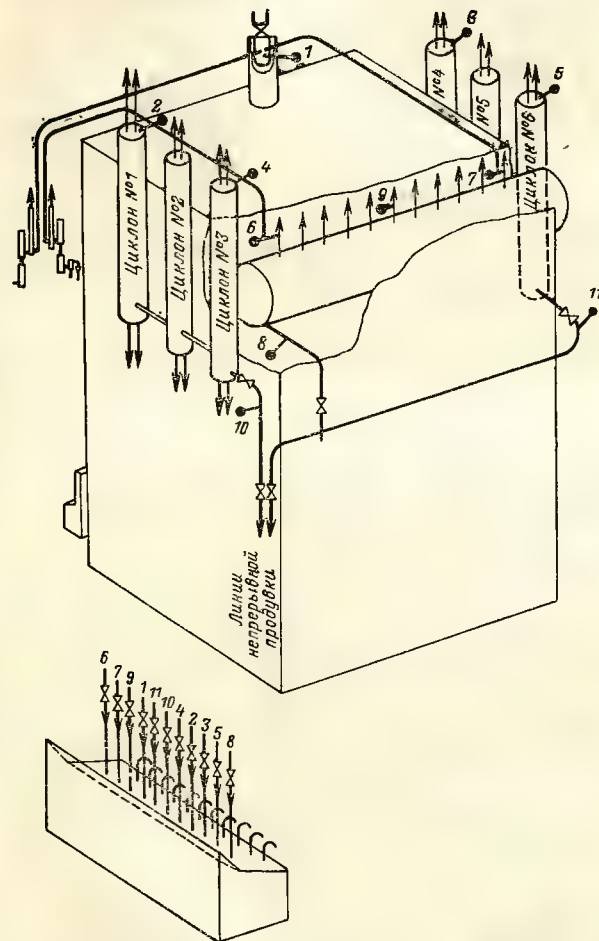


Рис. 9-4. Схема контроля качества пара и воды для котла со ступенчатым испарением.

1 — перегретый пар; 2, 3 — насыщенный пар II ступени; 4, 5 — насыщенный пар III ступени; 6, 7, 9 — насыщенный пар I ступени; 8 — котловая вода I ступени; 10, 11 — котловая вода III ступени.

сат. При большом числе отбираемых проб удобнее использовать более компактные многоточечные холодильники. Но обслуживание одноточечных холодильников более удобно, поскольку представляется возможным регулировать степень охлаждения каждой пробы в отдельности, что иногда является довольно существенным преимуществом.

Холодильники с воздушным охлаждением применяют при теплехимических испытаниях сравнительно редко, но в эксплуатации они очень удобны, так как не требуют охлаждающей воды. Эти холодильники представляют собой тонкие длинные трубки, которые прокладывают от котлов до химической лаборатории, чем улучшается культура производства, уменьшаются затраты времени на отбор проб, улучшается обслуживание котлов. Если требуется подать пробы на малое расстояние, то трубки воздушного холодильника для повышения теплоотдачи сворачивают в спирали либо снабжают ребрами.

В зависимости от степени сложности теплехимических испытаний объем измерений существенно различен. В обязательный для испытаний объем измерений и анализов входят записи следующих эксплуатационных данных: производительность котла, расход питательной воды, давление пара в барабане, температура перегретого пара, положение уровня воды в барабане и отсеках, а также определение щелочности питательной воды и котловой воды, щелочности либо содержания насыщенного и перегретого пара.

Часто проводят измерение перепада давления на отдельных трактах движения пара, пароводяной смеси и воды.

Производительность котлов определяют с использованием нормальных диафрагм, реже сопел Вентури. Перед испытаниями диафрагмы и сопла подвергают ревизии с целью уточнения проходных сечений. В качестве вторичных приборов для повышения точности измерений параллельно эксплуатационным расходомерам подключают дифманометры.

Давление в барабане с достаточной точностью можно определять по эксплуатационным манометрам, применяя поправку на столб воды (при сниженных приборах).

Уровни воды в барабанах и отсеках определяют по водоуказательным колонкам. Перед измерением уровней проверяют расположение колонок гидравлическим уровнем. В качестве нулевой отметки принимают ось барабана.

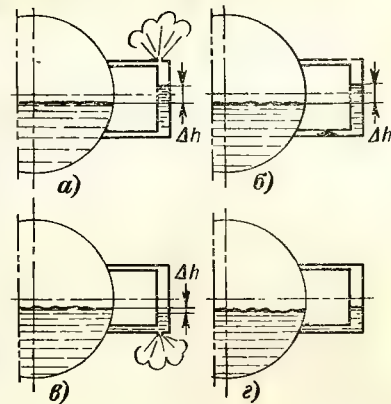


Рис. 9-5. Искажение показаний водоуказательных колонок о положении уровня воды в барабане.

а — неплотность в паровой части; б — засоренность водяной линии; в — пропуск в водяной части; г — нормальная работа колонки.

В случае отсутствия специальной метки на барабане с достаточной для практических целей точностью ($H \pm 5$ мм) ось барабана определяют по осям болтов на лазах барабана.

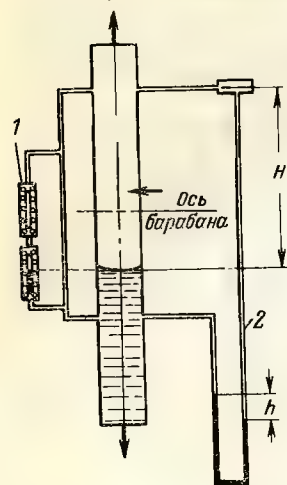


Рис. 9-6. Способы измерения уровней воды в циклоне.

1 — двоянная водоуказательная колонка; 2 — дифманометр.

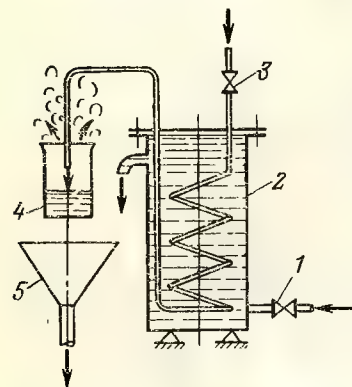


Рис. 9-7. Дегазация пара в эксплуатационном холодильнике.

1 — подвод охлаждающей воды; 2 — холодильник; 3 — вентиль для регулирования расхода проб; 4 — пробоборборная кружка; 5 — дренажная воронка.

На колонки наклеивают шкалы с сантиметровыми делениями, по которым удобно вести отсчет показаний. Колонки должны быть хорошо освещены, при плохом освещении можно пользоваться переносными лампами.

Водоуказательные колонки должны находиться в исправном состоянии. Пропаривание в соединениях и пропуск в дренажах недопустимы, так как это ведет к искажению показаний (рис. 9-5), что очень опасно, поскольку может привести к упуску воды из барабанов.

Паровые штуцера колонок нужно защищать от воздействия динамических струй пара. Если имеются перепускные трубы внутри барабана котла, то перед испытаниями во время остановки котла нужно проверить плотность этих труб.

При значительных уровнях пены в барабане необходимо устанавливать на паровых штуцерах защитные устройства. Запись показаний нескольких водоуказательных устройств необходимо делать быстро, чтобы достигнуть возможно большей одновременности записей быстро меняющихся величин.

Уровни воды в выносных циклонах измеряют спаренными водоуказательными колонками 1 — при колебании уровней, не превышающем 300—400 мм, либо дифманометрами 2, залитыми ртутью (рис. 9-6) — при колебании уровней воды в пределах ± 1000 мм.

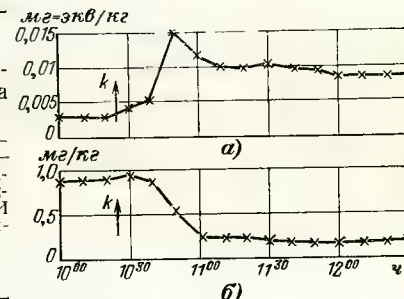
Предпочтительнее применять там, где это возможно, водоуказательные колонки, которые можно делать не только спаренными, но и строенными.

Анализ качества пара и воды проводят в соответствии с имеющимися методиками. Определение содержания пара удобно вести солемерами. Для повышения точности и чувствительности измерений перед проведением анализов проводится дегазация и обогащение проб. Кроме специальных приборов обогащение и де-

газацию проб можно осуществлять в обычно применяемых устройствах отбора. Поскольку ионы солей являются центрами конденсации, то представляется возможным, выпаривая часть исследуемой пробы, повышать концентрацию примесей в оставшемся выпаре. Одновременно с увеличением концентрации нелетучих соединений при выпаре происходит дегазация проб — удаляются кислород, углекислый газ, аммиак, что также повышает достоверность анализов качества пара. Пробы пара с большим содержанием углекислоты имеют кислую реакцию и лишь после дегазации и удаления основного количества углекислоты появляется щелочная реакция.

Рис. 9-8. График влияния дегазации пара в холодильнике на анализы.

а — график щелочности пара; б — график солесодержания пара; к — момент закрытия вентилей охлаждающей воды (по данным теплотехнических испытаний котла ЦКТИ 75/39-Ф на Березниковском химкомбинате).



Для получения представительных анализов Промэнерго разработан упрощенный метод дегазации проб пара путем неполной его конденсации в эксплуатационных холодильниках (рис. 9-7).

Методика дегазации несложна. Настроив холодильник на нормальное охлаждение, измеряют расход сконденсировавшейся пробы (обычно 40—60 кг/ч), после чего уменьшают подачу охлаждающей воды (без изменения расхода пробы пара); холодильник начинает «парить». Вновь измеряют расход сконденсировавшейся части пробы и одновременно производят анализы на щелочность и электропроводность; строят типичный график (рис. 9-8).

Коэффициент обогащения пробы $k_{об}$ определяют из соотношения расходов конденсата до и после уменьшения охлаждения пробы:

$$k_{об} = \frac{G_1}{G_2}, \quad (9-4)$$

где G_1 , G_2 — соответственно расход сконденсировавшейся части пробы до и после закрытия охлаждающей воды, кг/ч.

Такая методика применима при сравнительно несложных теплотехнических испытаниях котлов; в случае ответственных теплотехнических испытаний желателен спектральный анализ. Вследствие высокой чувствительности этого метода пробы можно не обогащать.

9-5. ПРИКИДОЧНЫЕ И ОСНОВНЫЕ ОПЫТЫ

С целью повышения достоверности результатов теплотехнических испытаний перед проведением основных (зачетных) обычно проводят несколько предварительных (прикидных) опытов

В этих опытах отрабатывают все измерения, которые потребуются в основных опытах; проверяют эффективность схемы контроля, тарируют солемеры, фотоколориметры и другие приборы. Определяют коэффициенты соотношения щелочности и содержания питательной и котловой воды.

Во время проведения прикидочных опытов обрабатывают все основные анализы — содержание и щелочность пара — и определяют степень дегазации проб.

Прикидочные опыты проводят при эксплуатационных условиях. Производятся, давление пара, уровень воды в барабане, воднохимический режим работы котла и другие показатели остаются эксплуатационными. Производится «фотография» работы котла.

Перед началом теплотехнических испытаний разрабатывают и утверждают программу испытаний. При согласовании и утверждении программы учитывают производственные возможности, разрабатывают основные положения техники безопасности, резервируют паровую мощность в котельной на случай выхода из строя испытываемого агрегата. С этой целью иногда целесообразно особо ответственные эксперименты проводить в ночное время, когда легче создать паровой резерв.

В программе обуславливают все основные параметры работы котла, а также особенности каждой группы опытов. Программа теплотехнических испытаний является документом, согласно которому эксплуатационный персонал ведет режим исследуемого котла. Представителям наладочной организации, проводящим теплотехнические испытания, не разрешается вести эксплуатацию котла даже во время проведения опытов. Все оперативные переключения, а также установление требуемых режимов работы котлов осуществляет эксплуатационный персонал.

В случае необходимости изменения программы вносят поправки, которые подлежат согласованию и утверждению. В программе, как правило, предусматриваются резервные опыты, целевое назначение которых выясняется в ходе испытаний.

Продолжительность опытов может быть существенно различной, однако режимные зачетные опыты с фиксированными параметрами проводятся в течение 1—4 ч. В случае производства анализов пара по накоплению солей в ионитовых фильтрах продолжительность опытов увеличивается до 10—24 ч.

Запись показаний приборов проводится через 5—20 мин. Следует добиваться одновременности всех записей основных показателей. Часы у всех наблюдателей (особенно если они находятся в разных местах и не видят друг друга) должны быть тщательно сверены. Можно пользоваться звуковыми или световыми сигналами.

На каждый опыт берется наряд-допуск, в котором необходимо перечислять всех участников эксперимента, они должны быть предварительно инструктированы по технике безопасности. После окончания опыта об этом докладывается начальнику смены, а дежурному коцегару даются указания по ведению дальнейшего режима работы котла. Показания приборов и данные анализов записываются в специальные журналы наблюдений. Записывают объект, дату, номер и тип котла, номер опыта, время и наименование отдельных пунктов наблюдений.

Для каждого опыта надо вести особый журнал, в нижней части которого, кроме измеряемых величин, желательно записывать основные манипуляции эксплуатационного персонала.

Например: 13³⁰ — продувка нижних точек левого бокового экрана;

14¹⁰ — увеличена непрерывная продувка;

14¹⁵ — регулирование подачи воздуха в топку.

Такие записи при последующей обработке материалов помогают определить причины изменений в работе котла. Руководитель испытаний должен в течение опыта несколько раз проверить правильность записей у каждого наблюдателя, что должно быть подтверждено подписью на полях журналов в моменты проверки. По окончании опыта все журналы должны быть подписаны наблюдателями.

Записи в журналах лучше делать простыми мягкими карандашами. При случайном намокании журналов такие записи не размазываются. Не рекомендуется непосредственно при записях производить какие-либо арифметические действия. Так, например, показания двухтрубных дифманометров лучше записывать по каждой трубке отдельно, с тем чтобы при обработке записи можно было сложить, а уж затем сделать пересчет по соответствующим кривым.

9-6. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ИСПЫТАНИЙ

В процессе проведения теплотехнических испытаний обрабатывать материалы необходимо непосредственно после окончания каждого опыта (в тот же день) с таким расчетом, чтобы к началу следующего опыта материалы предыдущих опытов были обработаны в виде графиков. Такой порядок обработки данных наиболее целесообразен, поскольку удастся обнаружить отдельные неувязки в ведении измерений и быстро их устранить.

Обработка материалов испытаний состоит из следующих стадий:

1. Первичная обработка (пересчет показаний приборов в измеряемые величины, например перевод э. д. с. термопар в градусы, перепада давлений — в скорость, сопротивления датчика солемера — в содержание).
2. Подсчет среднеарифметических величин по тем измерениям, где это необходимо.
3. Построение режимных графиков.
4. Построение функциональных графиков.
5. Составление технического отчета.
6. Формулировка основных выводов и рекомендаций по проведенной работе.
7. Проверка графической и текстовой части отчета.
8. Окончательное оформление и утверждение отчета.

Первичную обработку материалов легче проводить, если пользоваться специально составленными номограммами, графиками, таблицами. С целью уменьшения погрешностей масштабы вспомогательных графиков выбирают достаточно крупными, а таблицы — подробными, с малыми интервалами. Если для первичной обработки требуется проверить несколько операций подсчетов, то лучше эти операции выполнять порознь, в несколько приемов. Это также снижает количество ошибок.

Для ускорения подсчетов можно применять счетные машинки и арифмометры, для обработки материалов теплотехнических испытаний целесообразно применение электрических счетных машин.

Если имеется место на полях графиков, то результаты пересчетов допускается записывать рядом с первичными данными. По цвету цифры обработки должны резко отличаться от первичных записей.

Если первичная запись сделана простым карандашом, то результат пересчета должен быть записан цветным.

В процессе испытаний журналы наблюдений просматривают с целью выявления грубых ошибок. Явно ошибочные записи из рассмотрения исключают, обводят кружками (но не зачеркивают и не стирают!). В дальнейших расчетах такие записи не используют.

Подсчет среднеарифметических данных проводят тщательно; лучше вести их только для изменяющейся части цифр. Средние значения можно находить, выбирая за базу какое-либо число меньше средней величины (табл. 9-2).

Таблица 9-2

Данные измерений	Базовое число	Оперируемые числа	Среднее значение
128 136 128 122 116 96 112 124	100	+28 +36 +28 +22 +16 -4 +12 +24	$100 + \frac{162}{8} = 120,25$, которое округляем до 120
		Итого . . . 162	

Такой метод подсчета уменьшает ошибки и упрощает подсчеты. После определения средних величин целесообразно сравнить порядок полученной величины с теми, из которых они получены. Крупные ошибки легко находятся. Расчеты ведутся с точностью до трех знаков. При подсчете средних значений необходимо знать точность проводившихся измерений. Полученные средние значения не должны иметь существенно более высокий порядок точности; например: нельзя указывать среднюю температуру 112,843°С, измеренную ртутным термометром с точностью до 1°С, правильным будет 112,8°С или 113°С.

После подсчета средних величин составляют таблицу по всем опытам, в которой приводят все основные характеристики котла.

Построение режимных и функциональных графиков. Графики, в которых по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат — показатели режима работы котла, называют режимными. На этих графиках представляется возможным строить большое число кривых, что является их важным преимуществом. Первой (снизу) обычно строится кривая производительности котла, являющаяся основным показателем его работы, затем следуют перепады давлений, уровни, данные воднохимического режима и другие показатели в работе котла.

На этих же графиках можно отмечать моменты включения и выключения горелок, а также другие оперативные переключения, производимые в процессе опытов. Шкалы измеряемых величин удобно помещать с обеих сторон графика. Для наглядности сравнения различных графиков одного и того же испытания желательно мас-

штабы измеряемых величин, а также их расположение на графиках оставлять неизменными для всего испытания.

Режимные графики вычерчивают на миллиметровой бумаге разноцветными карандашами. При копировке применяют линии разной толщины и различного начертания (пунктирная, штрихпунктирная и др.). Образец графика с выполненными таким способом линиями показан на рис. 9-9. Наносить на различные шкалы показания оди-

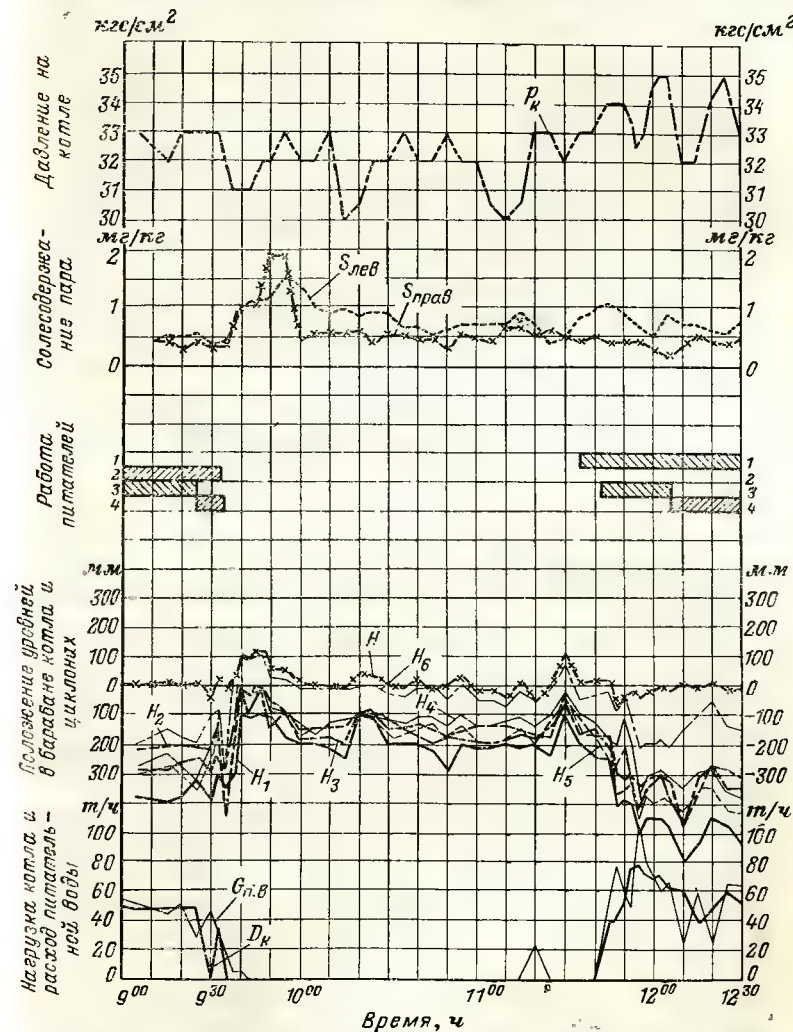


Рис. 9-9. Образец режимного графика теплотехнических испытаний котла со ступенчатым испарением.

наковых величин (например, уровни воды в выпосных циклонах) нецелесообразно.

На режимных графиках удастся рассмотреть основные зависимости.

Положительным свойством режимных графиков является то, что в них фиксируются все основные измерения, проведенные при испытании; это избавляет от необходимости составления и хранения приложений к техническим отчетам в виде копий журналов наблюдений (подлинники журналов наблюдений хранятся не менее года).

Кроме режимных составляют функциональные графики, показывающие зависимость изменения качества пара, уровня воды в солевых отсеках от производительности котла, качества котловой воды и уровня воды в барабане.

При теплотехническом испытании необходимо составлять три основных функциональных графика: зависимости качества пара от производительности котла, качества котловой воды и уровня воды в барабане. Для котлов со ступенчатым испарением требуется иметь зависимость уровня воды в солевых отсеках от производительности котла.

В каждом функциональном графике необходимо указать границы, в которых справедлива данная зависимость. Обычно эти данные располагают в левом верхнем углу графика (см. рис. 9-1). Такое построение функциональных графиков позволяет быстро ориентироваться в проведенных измерениях.

На графиках возможен разброс точек. Для оценки характера зависимости используют метод корреляции — определение степени разброса точек [Л. 48]. Коэффициент корреляции подсчитывают по формуле

$$r_{xy} = \frac{\sum \alpha\beta}{\sqrt{\sum \alpha^2 \beta^2}}, \quad (9-5)$$

где r_{xy} — коэффициент корреляции;

$\alpha = x - \bar{x}$ — разность между средними и текущими значениями аргумента;

$\beta = y - \bar{y}$ — разность между средними и текущими значениями функции.

Различают коэффициенты прямой и обратной зависимости.

Величину коэффициента корреляции определяют следующие основные зависимости:

$r_{xy} = 1$ — функциональная зависимость; $r_{xy} = 0,7$ — сильная зависимость; $r_{xy} = 0,5$ — слабая зависимость; $r_{xy} = 0,30$ — отсутствие зависимости.

Чем меньше разброс точек, тем больше коэффициент корреляции. Установлено, что графики, построенные по среднеарифметическим данным, имеют меньший разброс точек по сравнению с графиком, построенным по единичным измерениям.

В несложных теплотехнических испытаниях можно обходиться лишь функциональными графиками, поскольку они достаточно наглядно выражают сущность внутрикотловых процессов.

Технический отчет. После завершения экспериментов и окончания обработки материалов составляют технический отчет. При этом должны быть составлены таблицы и вычерчены основные графики. Такой порядок в значительной степени исключает ошибочное толкование отдельных опытов.

При составлении текстовой части отчетов руководствуются следующими общими положениями. В начале отчета приводят краткое описание испытываемого котла, а также оборудования котельной и указывают причины проведения испытаний. Далее следует описание схемы контроля. Ниже приводится ориентировочный план отчета:

1. Описание котельной и котла.
2. Описание схемы контроля.
3. Прикидочные опыты.
4. Основные опыты.
5. Описание режимных графиков.
6. Описание функциональных графиков:
 $S_{н.п} = f(D_k)$; $S_{н.п} = f(S_{к.в})$; $S_{н.п} = f(H_0)$.
7. Выводы и предложения.
8. Составление режимной карты.
9. Приложения к отчету.

В отдельных случаях указанный порядок изложения отчета и его объем в зависимости от конкретных требований к испытаниям может отличаться от приведенного.

Отчет подписывается руководителем испытаний и представляется на утверждение руководству наладочной организации, после чего пересылается заказчику.

Глава десятая

ИЗГОТОВЛЕНИЕ, МОНТАЖ И РЕМОНТ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

10-1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ ВНУТРИБАРАБАННЫХ УСТРОЙСТВ

Изготовление внутрибарабанных сепарационных устройств имеет свои особенности. Поскольку эти устройства не испытывают полного давления в котле и перепад давления на них обычно небольшой, требования в отношении их прочности невысокие.

Вместе с тем некоторые элементы внутрибарабанных устройств испытывают гидравлические удары, а потому их крепление должно быть надежным. Требуется также достаточно высокая плотность соединений.

Габариты отдельных деталей должны быть такими, чтобы наиболее крупные из них могли проходить через люки барабанов.

Сепарационные устройства должны быть достаточно компактными для возможности полностью открывать люзы и залезать внутрь барабана с установленными в нем собранными устройствами, хотя это требование удастся соблюдать не всегда, особенно при малых диаметрах барабанов.

При малой длине барабана отбор непрерывной продувки можно осуществлять не по всему барабану, а с

обоих торцов (рис. 10-1, а, б). Ввод питательной воды не обязательно осуществлять по оси барабана, можно сместить его к одной из боковых стенок и выполнить меньшей длины (рис. 10-1, в и г).

Жалюзийные сепараторы собирают в пакеты вне барабана, а пластины для них изготавливают на самодельных штампах.

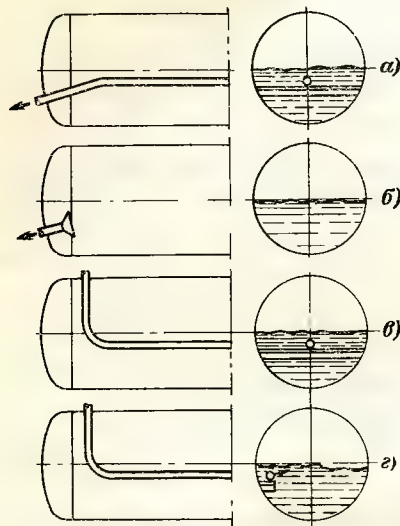


Рис. 10-1. Снижение громоздкости внутрибарабанных устройств.

а и б — устройство непрерывной продувки до и после переделок; в и г — питательные линии до и после переделок.

Готовые пакеты жалюзи крепят на болтах, клиньях либо сваркой. Поскольку обычные болтовые соединения внутри барабана с течением времени сильно «закипают» — покрываются слоем отложений — разбирать их сравнительно трудно, а потому резьбовые соединения при сборке промазывают графитом, что облегчает их разборку.

Более эффективным средством является применение разрезных гаек и клиновых соединений (рис. 10-2), что также облегчает разборку при сохранении достаточной прочности соединений.

Клиновые соединения для предотвращения ослабления от действия вибрации элементов после затяжки «прихватывают» в одной-двух точках электросваркой (рис. 10-2, б).

Крайние пластины каждого пакета выполняют большей толщины для повышения жесткости. Между пакетами оставляют зазоры, равные зазорам между пластинами внутри пакета. Жалюзи удобно крепить на направляющих полосах. Каждый пакет вводится с торца барабана. Можно применять и готовые элементы — уголки, однако в этом случае масса (вес) устройств увеличивается, так как выбор типа профилей обычно бывает ограниченным.

Готовые пакеты жалюзи крепят на болтах, клиньях либо сваркой.

Поскольку обычные болтовые соединения внутри барабана с течением

При установке внутри барабанов длинных коробов и коллекторов их выполняют с компенсаторами — сальниковыми и линзовыми.

Изготовление циклонов представляет значительные трудности. Их корпуса выполняют на вальцах либо используют для этого специальные приспособления к токарному или сверлильному станкам. Изготовление корпусов «из-под кулака» — недопустимо.

Внутренняя поверхность циклонов является рабочей, поэтому сварочные швы в них следует располагать на внешней стороне.

Перед монтажом новых сепарационных устройств проводят подготовительные работы.

В соответствии с ПТЭ котел заглушками отъединяют от паропровода, питательной линии, продувочных точек, линий аварийных сбросов воды.

Перед люками для лучшей вентиляции следует установить вентилятор (желательно осевой) с более холодной стороны котла на расстоянии примерно 1 м от люка. Это не создает препятствий для подачи деталей через люк, а также дает возможность влезать в барабан (рис. 10-3). Подача шлангом сжатого воздуха в барабан менее эффективна.

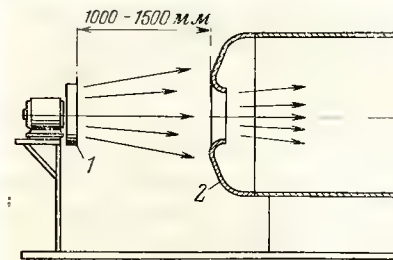


Рис. 10-3. Установка вентилятора перед люком барабана.
1 — вентилятор; 2 — барабан.

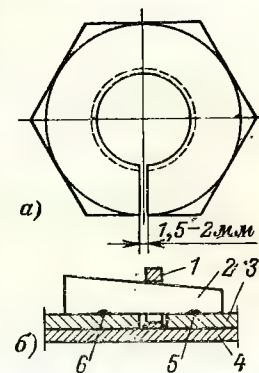


Рис. 10-2. Элементы креплений внутрибарабанных устройств.

а — разрезная гайка; б — клиновое соединение; 1 — ушко; 2 — клин; 3 — прикручиваемая деталь; 4 — основа; 5 и 6 — точечная приварка клина.

Для предотвращения засорения опускаемых труб в нижней части барабана укладывают резиновый либо паранитовый коврик. Кроме защиты труб от засорения такие коврики повышают также безопасность работ внутри барабана.

Перед началом монтажа полностью демон-

тируют имеющиеся сепарационные устройства, а также проводят ревизию стенок барабана.

Приваренные к стенкам барабана детали отрезают не заподлицо, а оставляя кромку 3—5 мм, с тем чтобы предохранить участки стенок барабана от повреждения (рис. 10-4).

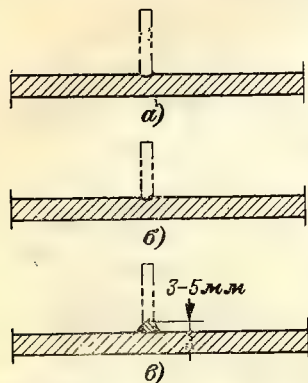


Рис. 10-4. Срезка деталей со стенок барабана.

а и б — неправильно; в — нормально срезанная деталь.

10-2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ ВЫНОСНЫХ ЦИКЛОНОВ

В связи с большой важностью обеспечения прочности выносных циклонов наиболее желательным является изготовление их в заводских условиях. Однако широко практикуется изготовление циклонов на монтажных площадках силами специализированных монтажных организаций либо ремонтных цехов электростанций. Для корпусов используют стандартные цельнотянутые либо цельнокатаные трубы, что ограничивает выбор диаметра выносных циклонов в отличие от внутрибарабанных, диаметр которых может быть выбран произвольным.

Обычно циклоны подвешивают на каркасе котла. Крепление должно быть достаточно прочным (рис. 10-5). В некоторых случаях предусматривается крепление за нижнюю и среднюю части корпуса, что неправильно, поскольку при этом в эксплуатации возможно появление вибрации. Это приводит к необходимости остановки котла для дополнительного крепления циклонов.

Причиной вибрации является в основном появление в водяных объемах глубоких асимметричных воронок,

вращение которых с частотой, близкой к резонансной, способствует появлению устойчивых колебаний циклонов. Во избежание этого, кроме усиления жесткости креплений, следует предусматривать устройства для надежного разрушения воронок.

Известные трудности представляет сверление барабанов, которое иногда необходимо при установке выносных циклонов. Как правило, поручать эти работы следует специализированным организациям.

Изолировочные работы проводятся после опрессовки котла с вновь установленными циклонами в обычном порядке.

К числу распространенных дефектов монтажа выносных циклонов можно отнести пренебрежение к устройствам для измерения уровней воды в циклонах, хотя при проектировании на боковых стенках циклонов всегда предусматривают штуцера для водоуказательных устройств. Эти устройства необходимо обязательно устанавливать перед растопкой котла, с тем чтобы измерять уровни воды при наборе нагрузки. Впоследствии их можно снять.

Схемы контроля качества пара и воды следует также выполнять во время монтажа, не откладывая это на более позднее время.

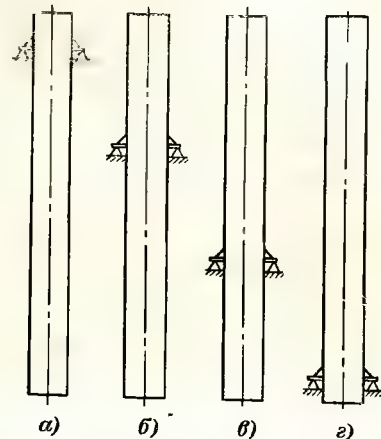


Рис. 10-5. Крепление выносных циклонов.

а и б — правильное — в верхних точках; в и г — неправильное — в нижних точках.

10-3. РЕМОНТ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Необходимость ремонта сепарационных устройств вызывается следующими обстоятельствами:

1. В процессе демонтажа и повторного монтажа сепарационных устройств, а также при выполнении ряда мероприятий на котлах возможно повреждение отдельных деталей или потеря их.

2. В процессе эксплуатации происходит коррозия топкостенных элементов, приводящая к нарушению их нормальной работы.

3. Под действием ударов пароводяных струй в барабане возможно разрушение отдельных узлов.

4. Проходные сечения сепараторов забиваются накипью и другими отложениями, что приводит к нарушению их нормальной работы.

5. Неправильное выполнение предыдущих монтажных работ.

Наличие повреждений сепарационных устройств выявляется наблюдениями за работой котла. Ухудшение качества пара, пульсация уровней воды в барабане, повреждения циркуляционного характера служат признаками нарушения нормальной работы котла вследствие возможных неисправностей во внутрикотловых устройствах.



а)



б)

Рис. 10-6. Перегородки в коллекторах.

а — составная, вводимая через люки; б — сплошная, более надежная.

Анализ причин подобных неисправностей обычно требует осмотра сепарационных устройств.

Повреждениями, возникающими в результате демонтажа и повторного монтажа, обычно являются неплотности в соединениях, которые легко заметить с использованием переносной лампы. На стенках барабана и близлежащих деталях около неплотностей обнаруживаются следы налетов, образующиеся в результате прорыва неотсепарированного пара через неплотности. Коррозионные повреждения легко

обнаруживаются при осмотре (например, проржавевшие листы жалюзийных сепараторов).

В труднодоступных местах коррозионные повреждения выявляются при заливке водой короба. После обнаружения неплотностей устранение их обычно не представляет особого труда.

Часто встречающиеся неплотности в перегородках коллекторов выявляются также заполнением их водой. Ранее перегородки вводились в коллектор через лючки по частям, и, пользуясь зеркалом, их заваривали на месте гнутыми электродами изнутри. В настоящее время более надежным считается разрезание коллектора и

установка плотной перегородки с заваркой двух внешних швов под давлением (рис. 10-6,б).

В случае обнаружения неплотностей в перегородках старого типа наиболее надежно их устраняют установкой глухой перегородки.

Для удаления образующихся отложений сепарационные устройства приходится демонтировать и подвергать их кислотной либо механической чистке вне барабана.

Одновременно с этим находят и устраняют причины, вызвавшие образование отложений.

Чаще всего это происходит из-за попадания питательной воды.

Удары струй пароводяной смеси могут разрушать отдельные элементы сепарационных устройств либо срывать их с места. В этих случаях требуется изготовить более прочные детали с более надежным креплением.

Следует отметить, что в процессе недостаточно квалифицированного монтажа иногда забывают устанавливать отдельные детали — например, торцы коробов, что приводит к существенному ухудшению работы сепараторов.

Во всех случаях кроме устранения обнаруженных дефектов нужно выявлять причины, их вызывающие. После проведения перечисленных ремонтных работ обязательна тщательная проверка качества и объема их исполнения ответственным специалистом.

10-4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В БАРАБАНАХ

При работе в барабанах котлов требуется соблюдать действующие правила техники безопасности.

Работы внутри барабанов проводятся в очень сложных условиях: при высокой температуре окружающего воздуха, тесноте, плохом освещении. Часто воздух загрязнен пылью или газами. Кислородные и ацетиленовые шланги, сварочный кабель и инструменты, находящиеся в барабане, создают тесноту и сильно усложняют условия работы ремонтного персонала, делая ее небезопасной. Барабаны загромождены сепарационными устройствами, лазы в них — тесные и узкие. Малые размеры барабанов промышленных котлов усугубляют трудности при проведении ремонтных работ.

Барабан через кипяtilьные, пароперегревательные и экономайзерные трубы соединен с продувочными, пи-

тательными, пробоотборными и другими линиями, заполненными паром либо горячей водой от соседних котлов, а потому при выполнении работы в барабане требуется обязательная проверка наличия заглушек на всех линиях, соединяющихся с паром либо с водой. Для работ внутри барабанов состав бригад подбирают особой тщательностью.

Капитальные ремонты котлов проводят в основном в летние месяцы. В южных районах страны работы в барабанах лучше вести не днем, а ночью, поскольку в это время температура наружного воздуха заметно понижается.

При громоздких сепарационных устройствах и малых размерах барабанов целесообразно вывинчивать болты из люков, что облегчает доступ в барабан.

Глава одиннадцатая

НАЛАДКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

11-1. ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

В некоторых случаях условия эксплуатации котлов оказывают существенное влияние на работу сепараторов. Например, распространенное в промышленной энергетике снижение давления пара в барабанах котлов не вызывает ухудшения условий циркуляции и сравнительно слабо влияет на топочные процессы, но на работу сепарационных устройств понижение давления часто оказывает резко отрицательное влияние.

Следовательно, одним из основных условий нормальной эксплуатации сепарационных устройств является поддержание давления пара в котлах в заданных пределах. В тех случаях, когда по условиям эксплуатации представляется целесообразным снизить давление пара в барабане котла, нужно одновременно с этим проверить работоспособность, а при необходимости и модернизировать сепарационные устройства.

Уровень воды в барабане также сильно влияет на работу сепарационных устройств. Понижение уровня от номинального вызывает уменьшение эксплуатационной

надежности котлов, поэтому практикуется сравнительно редко.

Повышение же уровня «на всякий случай» от возможных упусков воды, а также для улучшения охлаждения стенок барабана (например, в котлах ДКВР—ДКВ) практикуется весьма часто. При этом незначительно повышается надежность работы котла, но существенно ухудшаются условия работы сепарационных устройств.

По данным Госгортехнадзора подавляющее большинство упусков воды на котлах происходит при выключенных либо неисправных автоматах питания и сигнализаторах уровня.

Для нормальной эксплуатации сепарационных устройств требуется выдерживать уровень воды в барабанах в пределах, указанных заводом-изготовителем. Одно время считалось, что снижение уровня воды в выносных циклонах оказывает положительное влияние на процесс сепарации. Однако, как было указано выше, с понижением уровня воды в циклонах качество пара не улучшается, а при известных условиях чрезмерное понижение уровня может приводить к ухудшению качества пара.

Для нормальной эксплуатации выносных сепараторов требуется поддержание уровня воды в них в пределах до —500 мм от оси барабана.

Источником ухудшения работы сепарационных устройств являются также тепловые перекосы в топках шириной более 4 м. Особенно чувствительны к тепловым перекосам схемы ступенчатого испарения из-за появления химического перекоса по отсекам, который может вызвать ряд нежелательных явлений.

Химический перекося по отдельным контурам солевых отсеков возможен и в случае неправильно выполненной продувки котла. Иногда по условиям воднохимического режима можно работать с весьма малым расходом непрерывной продувки. Так, например, в котлах, оборудованных ступенчатым испарением с выносными циклонами, при конденсатном режиме величину непрерывной продувки котла можно без ухудшения качества пара довести до сотых долей процента.

Однако такая эксплуатация чрезвычайно нежелательна, поскольку снижается надежность работы котла.

В результате возникают аварии с повреждением кипяtilных труб солевых отсеков из-за интенсивного отложения вторичной накипи в них.

Поддержание продувки в пределах ПТЭ является необходимым условием нормальной эксплуатации сепарационных устройств. Излишне мощные периодические продувки котла способны вызвать циркуляционные аварии. С другой стороны, отсутствие периодических продувок обуславливает скопление шлама в нижних коллекторах, что может приводить к интенсификации отложений вторичной накипи. Ошибки эксплуатации могут существенно ухудшить работу сепарационных устройств котлов.

11-2. ПУЛЬСАЦИЯ УРОВНЕЙ ВОДЫ В БАРАБАНАХ

В эксплуатации иногда происходит пульсация уровня воды в барабанах. Амплитуда колебаний может дости-

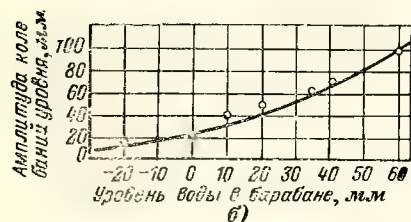
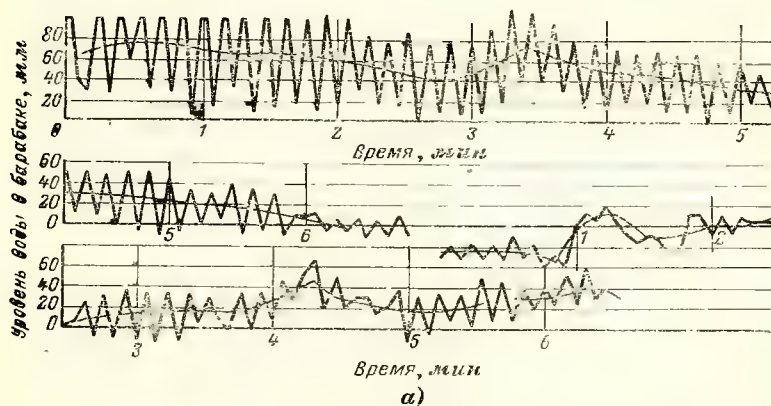


Рис. 11-1. Пульсация уровня воды в барабане котла ДКВР 10/13.

а — график пульсации; б — график зависимости амплитуды колебаний уровня от среднего его положения.

гать ± 80 мм, что является опасным для котла. На рис. 11-1 показана пульсация уровня в барабане одного из котлов ДКВР-10/13. Продолжительность каждого периода колебаний составляла 10 сек. Амплитуда колебаний изменялась от 60 до 20 мм. Величина колебаний зави-

села от среднего уровня. С повышением среднего уровня амплитуда колебаний возрастала (рис. 11-1,б), что указывает на связь причин, вызывающих раскочку уровня с сепарационными процессами.

Было установлено, что в моменты повышения уровня содержание пара резко возрастало. Повышение плотности пара из-за увеличения его влажности приводило к заметному увеличению сопротивления линии, соединяющей котел со сборным коллектором. Давление в барабане соответственно этому повышалось, что приводило к понижению уровня из-за уменьшения объема пароводяной смеси в котле. Одновременно с понижением уровня улучшалось качество пара, что снижало сопротивление паропровода и в свою очередь приводило к повышению уровня. Процесс автоколебаний; имеет место явление резонанса.

В качестве наиболее радикальных мер против этого явления может служить модернизация сепарационных устройств для повышения эффективности их работы. Следует отметить, что колебание уровня при плохом качестве пара происходит не всегда и зависит от конструктивных особенностей котельных агрегатов.

Большое колебание уровня наблюдается и при малой влажности пара в случае применения схем ступенчатого испарения. В котлах, оборудованных ступенчатым испарением, при излишне больших диаметрах водоперепусков от барабана к циклонам также возможна пульсация уровня.

Для уменьшения пульсации на одном из котлов ШБ-А5 было предложено установить дроссельные шайбы в водоперепускных трубах с уменьшением диаметра этих труб от 100 до 50 мм.

К причинам, вызывающим колебания уровня воды в барабанах, можно отнести неправильное выполнение сепарационных устройств. В частности, глухие паросборные короба, направляющие пароводяную смесь в циклоны, способствуют пульсации уровня воды в барабане. Для устранения этого следует раскрыть короба снизу и осуществить перепуск основной массы воды помимо циклонов (рис. 11-2). На рис. 11-3 изображены две диаграммы показаний уровнемеров при глухом и раскрытом коробе котла БКЗ-75/39ГМ. Аналогичные эксперименты проводились также на котлах ГМ-50-1 [Л. 31]. Во всех случаях отмечалось значительное уменьшение пульсаций уровня.

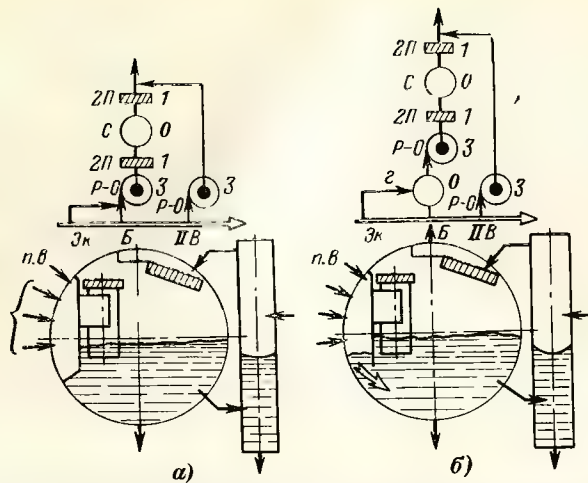


Рис. 11-2. Конструктивные и структурные схемы сепарационных устройств котла БКЗ-75/39 ГМ до и после раскрытия паросборного короба.
а — до раскрытия; б — после раскрытия.

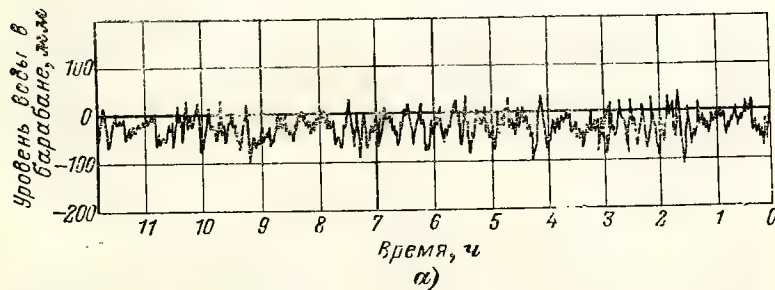


Рис. 11-3. Показания уровнемера котла БКЗ 75/39 ГМ.
а — до раскрытия короба; б — после раскрытия короба.

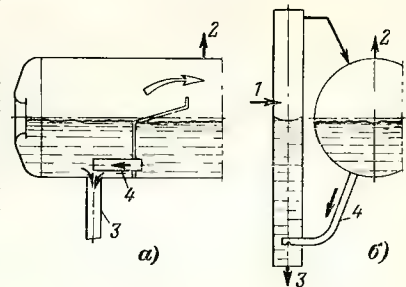
11-3. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЕЙ ВОДЫ ПО ОТСЕККАМ

Уровень воды в солевом отсеке может быть ниже и выше уровня воды в барабане. Большое расхождение уровней нежелательно, поскольку при этом снижается эксплуатационная надежность котла в целом. Стабилизация положения уровней по отсекам достигается применением различных методов.

Для повышения уровня в солевом отсеке можно использовать эжектирующее действие опускных труб (рис. 11-4). Для этого выходное отверстие водопе-

Рис. 11-4. Подъем уровней воды в солевых отсеках вследствие эжектирующего действия опускных труб.

а — устройство внутри барабана; б — устройство в выносном циклоне. 1 — ввод смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды; 4 — водоперепускная труба.



репускной трубы размещают возле устья опускной трубы, что вызывает подсос воды по водоперепускной трубе. Эти устройства применялись как для внутрибарабанных, так и для выносных устройств. Эффективность их действия ограничена величиной разрежения, создаваемого опускными трубами.

Эжектирующее действие опускных труб ОРГРЭС проверил на котлах среднего давления ЛМЗ-160/200 и ТО-3-200.

Причиной недопустимого расхождения уровней воды по отсекам является большой перепад давления на пароперепусках от барабана и циклонов до паросборника. Для уменьшения расхождения уровней в этих случаях применяют уравнительные трубы (рис. 11-5), соединяющие паровое пространство циклонов и барабана. Уравнительные трубы целесообразно применять для пароперепусков, гидравлическое сопротивление которых превышает $1\,000\text{--}1\,500\text{ кгс/м}^2$.

Уравнительные трубы применены на котле ШБ-А7, оборудованном ступенчатым испарением. В барабане

котла при модернизации оставлен выходной циклон, обладающий повышенным сопротивлением ($1\,000\text{--}3\,000\text{ кгс/м}^2$). Вместе с ростом производительности котла повышается и уровень воды в циклонах, однако часть пара из барабана перепускается по уравнильным трубам, что уменьшает высоту подъема уровней.

В данном случае вместо установки уравнильной трубы можно было бы заменить внутрибарабанные устройства: взамен выходного циклона установить пароприемный потолок с промежуточными жалюзи. Сопротивление пароперепусков по 500 мм следовало уравни-

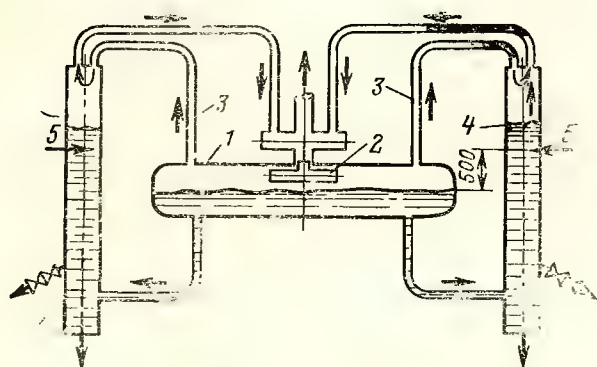


Рис. 11-5. Стабилизация уровней в выносных циклонах установкой уравнильных труб.

1 — барабан; 2 — выходной внутрибарабанный циклон; 3 — уравнильная труба; 4 — выносной циклон; 5 — ввод смеси.

нять. Тогда возможная разница уровней составила бы $100\text{--}200\text{ мм}$, что не опасно для работы циркуляционных контуров. Повышенные трудозатраты вызываются установкой в отдельных случаях дополнительных пароперепусковых труб.

Имеется третий метод стабилизации уровней. По своей надежности он превосходит два первых, но требует в ряде случаев повышенных трудозатрат при модернизации. Этот способ заключается в уменьшении действующих на уровень в отсеке перепадов давлений до таких значений, при которых максимальные отклонения уровня от оптимального не ухудшают работы котла.

Опыт эксплуатации показывает, что стабилизация уровней в солевых отсеках повышает эксплуатационную надежность котлов.

11-4. СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДУВКИ

Стабилизация непрерывной продувки имеет большое значение для экономичной и надежной эксплуатации котлов. Одной из первых удачных конструкций был продувочный узел ОРГРЭС (рис. 11-6),

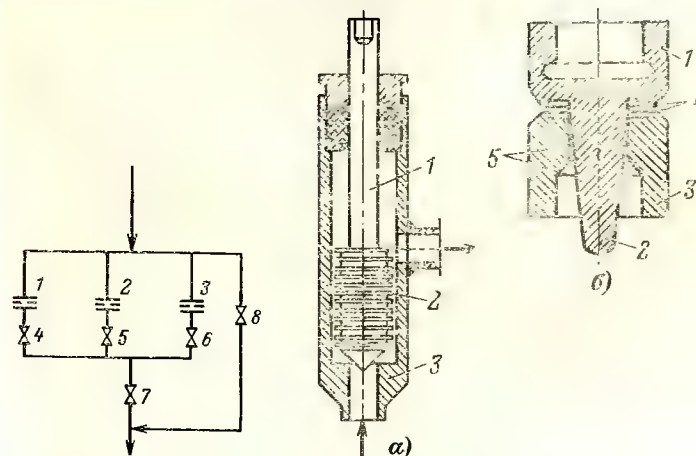


Рис. 11-6. Продувочный узел ОРГРЭС.

1, 2, 3 — дроссельные шайбы различных диаметров; 4, 5, 6 — запорные вентили; 7 — вентиль выключения узла; 8 — обводный вентиль.

Рис. 11-7. Регулирующие вентили.

а — лабиринтный вентиль; 1 — шток; 2 — регулирующие кольца; 3 — корпус; б — игольчатый вентиль; 1 — клапан; 2 — игла; 3 — седло; 4 — отключающие поверхности; 5 — регулирующие поверхности.

в котором помещались три-четыре дроссельные шайбы, изготовленные из высокопрочной стали. Шайбы имели различный диаметр, что позволяло осуществлять ступенчатое регулирование. Система с тремя шайбами имеет семь вариантов включения — семь различных фиксированных расходов продувки. К недостаткам схемы относятся невозможность плавного регулирования, увеличенное количество запорной арматуры, быстрый износ шайб.

Более плавное регулирование достигается применением специальных устройств (рис. 11-7). В лабиринтном вентиле (рис. 11-7,а) [Л. 49] включается по очереди несколько шайб. Недостаток этой конструкции — быстрая забиваемость кольцевых отверстий, поскольку ширина каждого кольца весьма незначительна. Хотя игольча-

тый клапан (рис. 11-7,б) и создает плавное регулирование, игла и седло подвержены быстрому истиранию, кольцеобразный зазор между седлом и иглой забивается. Преимуществом игольчатых клапанов является повышенная эксплуатационная надежность, обуславливаемая тем, что функции отключения и регулирования в этом клапане разделены.

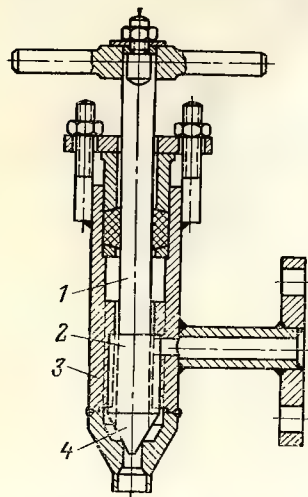


Рис. 11-8. Лабиринтный клапан.

1 — шток; 2 — регулирующая резьба; 3 — корпус; 4 — отключающий клапан.

расход жидкости (рис. 11-9). Регулирующие поверхности клапана сравнительно мало изнашиваются из-за того, что на каждом из зубцов срабатывается сравнительно малая доля перепада давления на трассе котел — расширитель.

Эксплуатационные наблюдения за работой клапана подтвердили его хорошую регулировочную характеристику. Колебание величины непрерывной продувки сократилось с 3—9 до 4—6%, что повысило экономичность и надежность эксплуатации котлов [Л. 50]. Расход продувочной воды котла ШБ-А7 значительно выровнился (рис. 11-10); этот клапан можно применять и при высоком давлении.

Сравнительно трудным для промышленной энергетики является определение расхода продувочной воды, по-

скольку для малых котлов величина непрерывной продувки составляет менее одной тонны в час. Такие расходы нормальными диафрагмами не измеряются.

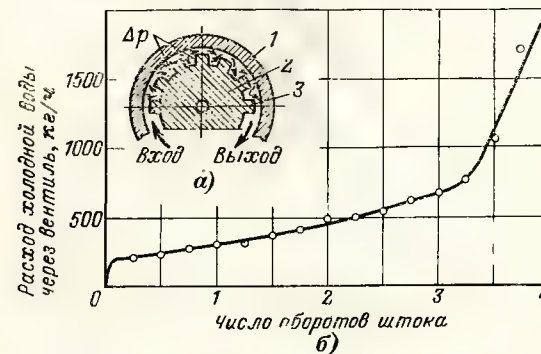


Рис. 11-9. Тарировка клапана на холодной воде.

а — схема действия лабиринта; 1 — корпус; 2 — регулирующая резьба; 3 — зубцы; б — зависимость расхода воды от числа оборотов штока; Δp — перепад давления на одном зубце.

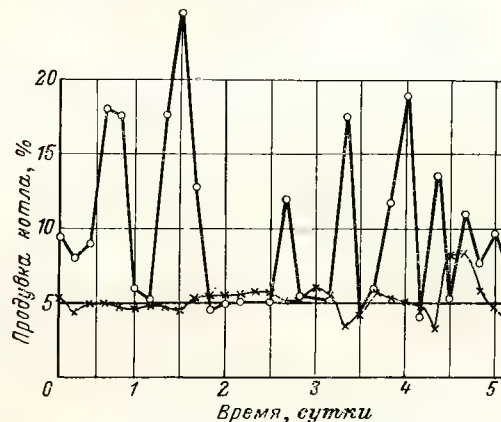


Рис. 11-10. Эксплуатационный график расхода непрерывной продувки.

○ — при обычном клапане; × — при лабиринтном клапане.

В практике наладки отработан продувочный узел, в котором в качестве указывающего прибора использован манометр, включаемый за регулирующим клапаном

(рис. 11-11). Давление, показываемое манометром, пропорционально расходу продуваемой воды. Тарирование узла производится по солевому балансу.

Практика наладки подтвердила, что продувочные узлы с манометрами в качестве показывающих приборов дают достаточно надежные данные о расходе продувочной воды.

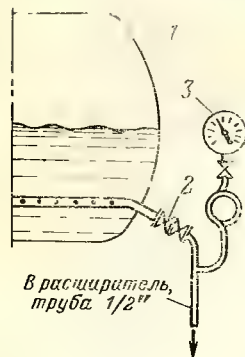


Рис. 11-11. Продувочный узел с манометром.

1 — барабан; 2 — запорный и регулирующий вентили; 3 — манометр.

Представляется возможным построить график зависимости щелочности котловой воды от щелочности питательной воды при различных расходах непрерывной продувки (рис. 11-12). Предварительно проведенными тепломеханическими испытаниями устанавливается оптимальный процент непрерывной продувки для каждого котла, после чего в эксплуатации поддерживается определенный расход продувки [Л. 51].

Пример. Щелочность питательной воды 0,9 мг-экв/кг, рекомендуемый размер продувки 6%. По графику на рис. 11-12 требуемая щелочность котловой воды составит 16 мг-экв/кг. На следующий день щелочность питательной воды составила 1,0 мг-экв/кг. По тому же графику требуемая щелоч-

II—На-катионирование добавочной воды обуславливает переменную щелочность питательной воды. При ведении водного режима котлов по щелочности котловой воды может происходить изменение концентрации солей в котловой воде. Поддержание постоянного значения щелочности котловой воды при резко переменной щелочности питательной воды может привести к нестабильной, непрерывной продувке.

Переход на другой метод контроля обычно бывает затруднителен (например, применение анализов на хлориды требует более дорогих реактивов).

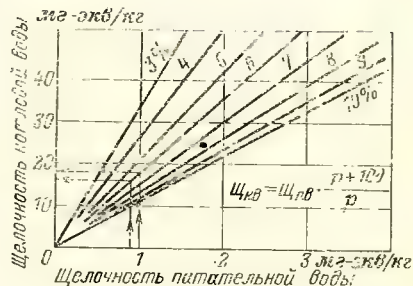


Рис. 11-12. Зависимость щелочности котловой воды от щелочности питательной воды при различных расходах непрерывной продувки.

ность котловой воды составляет 18 мг-экв/кг. Как видно, пользование этим графиком несложно и может оказаться значительно проще перехода на другой метод анализа котловой воды.

11-5. ВЫРАВНИВАНИЕ СОЛЕСОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ЦИКЛОНАХ

В тех случаях, когда в солевом отсеке работает параллельно несколько выносных циклонов, требуется следить за тем, чтобы солесодержание котловой воды в них было одинаковым. Наиболее рациональной является организация продувки из каждого циклона по самостоятельной линии и контроль расхода непрерывной продувки из каждого циклона отдельно. На практике такие схемы применяют редко. Более распространенным является применение различных устройств для выравнивания солесодержания воды в отдельных циклонах. С этой целью применяется перекрещивание опускных труб либо установка перемычек большого диаметра по воде. Хорошие результаты дает одновременное применение обоих мероприятий. Перекрещивание опускных труб иногда вызывает разбежку уровней в циклонах из-за различия характеристик циркуляционных контуров.

В качестве примера можно привести выполненную автором наладку неправильно запроектированной схемы ступенчатого испарения с выносными циклонами на котле ШБ-А7.

На твердом топливе модернизированные котлы длительное время работали без аварий, но с переводом их на газ начались аварии с одновременным выходом из строя по 10—15 кипяtilльных труб. При анализе причин повреждений было установлено, что схема непрерывной продувки была выполнена неправильно (рис. 11-13,а). Из-за объединения линий непрерывной продувки появились значительные солевые перекосы в отдельных циклонах, имеющих изолированные циркуляционные контуры. В каждом циклоне на продувочных линиях имелись перфорированные насадки. Эти насадки были недоступны для осмотра и часть из них оказалась забитой отложениями. Была организована схема рециркуляции воды из II ступени в чистый отсек, причем на каждой линии установлено по регулирующему вентилу (на рисунке не показано).

Через два часа после включения линий рециркуляции щелочность котловой воды чистого отсека возросла с 4 до 40 мг-экв/кг, а щелочность продувочной воды — до 160 мг-экв/кг. Такая высокая щелочность объясняется выводом из отдельных циклонов высококонцентрированной котловой воды. Через некоторое время щелочность в обоих отсеках была доведена до нормы (рис. 11-14).

В ближайшую остановку котла схема непрерывной продувки была изменена (рис. 11-13,б). Перфорированные насадки из циклонов демонтированы, а на каждой линии добавлено по регулирующе-

му вентилю. Последующая проверка работы параллельно включенных циклонов путем отбора проб для анализа из штуцеров водоподводящих устройств циклонов показала, что соленосодержание котловой воды одинаково во всех циклонах. Впоследствии аналогичной модернизации был подвергнут еще один котел этой же котельной. Аварии прекратились, что указывает на правильность принятых решений [Л. 33].

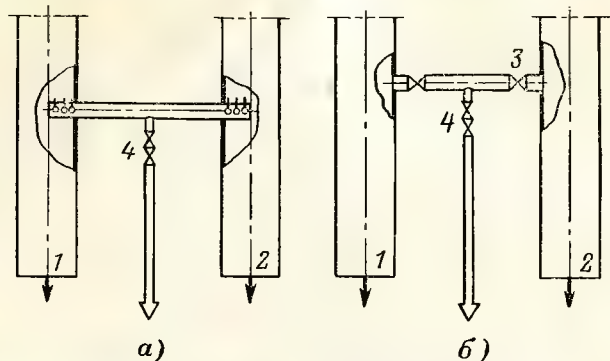


Рис. 11-13. Схемы непрерывной продувки.

а — до наладки; б — после наладки. 1 — циклон заднего экрана; 2 — циклон бокового экрана; 3 и 4 — запорный и регулирующий вентили.

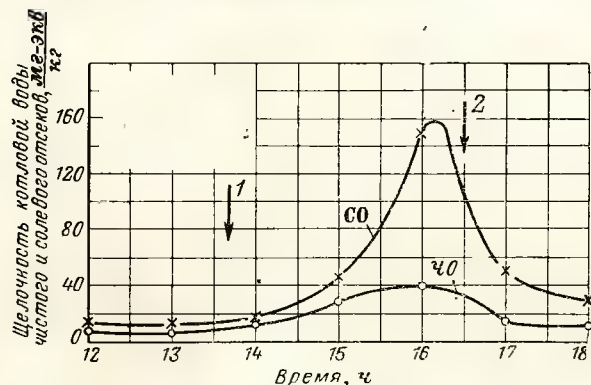


Рис. 11-14. График включения схемы рециркуляции.

1 — включение схемы; 2 — включение продувки нижних точек; СО — солевой отсек; ЧО — чистый отсек. ($D_K=12$ т/ч, $p_K=6.5$ кгс/см²).

Из этого примера можно сделать следующий вывод. В тех котельных, где наблюдается пережог кипяtilльных труб солевых отсеков, необходимо организовать контроль соленосодержания котловой воды по отдельным циклонам.

При наличии значительного расхождения щелочности котловой воды необходимо предпринимать меры, аналогичные описанным выше. В качестве временных мер рекомендуется до остановки котла усилить периодическую продувку контуров с повышенной концентрацией котловой воды. Целесообразно также, если имеется возможность, временно снизить производительность котла для уменьшения тепловых напряжений поверхности нагрева. Рекомендуется также сравнивать концентрацию котловой воды в отдельных циклонах и для тех котлов, на которых пережог труб не наблюдается. Выравнивание концентрации солей в параллельно включенных контурах позволит сократить размер непрерывной продувки.

11-6. МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Высокая влажность пара, считавшаяся ранее допустимой для промышленных котлов, ухудшает условия эксплуатации и создает большие энергетические потери питательной воды и связанное с этим увеличение потерь тепла с самопродувкой, интенсификацию процессов коррозии вследствие увеличения расхода питательной воды и соответственно кислорода (при возможном ухудшении деаэрации).

Широкое распространение неудовлетворительно работающих сепарационных устройств, обуславливающих выработку пара высокой влажности, затрудняет и сдерживает развитие промышленных предприятий, а в ряде случаев при использовании пара в технологии производства и наличии контакта греющего пара с вырабатываемой продукцией (электролизные процессы, производство различных препаратов и т. п.) пар высокой влажности существенно ухудшает производственные процессы. Ухудшается также теплообмен в технологических аппаратах, так как в случае поступления в теплотрассы большой протяженности пара большой влажности уменьшается количество пропускаемого пара, что в отдельных случаях ухудшает теплоснабжение.

Поскольку часть конденсата неизбежно теряется (см. табл. П-1), то с увеличением влажности пара возрастают потери тепла. Из сказанного видно, что эффективная модернизация сепарационных устройств промышленных котлов уменьшает тепловые потери котельных и повышает культуру эксплуатации котлов.

Разработка надежно эксплуатируемых сепарационных устройств для паровых котлов среднего и низкого давления определяется условиями работы этих котлов: пониженные требования к качеству пара, небольшая единичная мощность котлов, малая плотность пара, большая плотность воды.

Эти особенности упрощают и облегчают работу сепарационных устройств, но имеются условия, затрудняющие и усложняющие нормальную работу сепараторов: сравнительно тяжелые условия воднохимического режима, малый диаметр барабанов, малая высота сепарационно-активного объема, высокая объемная нагрузка, обусловливаемая пониженным давлением пара.

Из этого следует, что при выборе оптимальных сепарационных устройств для котлов низкого и среднего давления нельзя копировать технические решения, применяемые для больших энергетических котлов высокого давления.

Ниже приведены примеры модернизации сепарационных устройств.

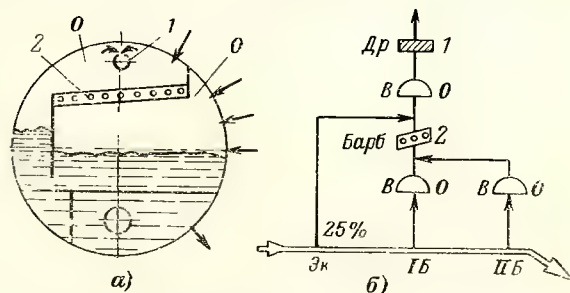


Рис. 11-15. Конструктивная (а) и структурная (б) схемы сепарационных устройств котла СУ-9/39 до модернизации.

0, 1, 2 — типы сепараторов; В — восходящий; Барб — барботажный; Др — дроссельный; Эк — экономайзер; ГБ — первая ступень, барабан; ЦБ — вторая ступень, барабан.

Котлы СУ-9/39. В котельной ТЭЦ установлены два котла типа СУ-9/39, оборудованных ступенчатим испарением. Вследствие тяжелых условий воднохимического режима ($S_{пв} \geq 1000 \text{ мг/кг}$) работа сепарационных устройств этих котлов была явно неудовлетворительна.

Анализ структурной схемы сепарационных устройств этих котлов (рис. 11-15, б) позволяет сделать следующие выводы:

1. Сильнокипящий водяной экономайзер подает пароводяную смесь высокого солевого содержания на паропромывочное устройство.

Сепарация пара, поступающего из экономайзера, недостаточна, а потому на выходе пароводяной смеси из экономайзера требуется установить автономные циклоны по схеме, показанной на рис. 6-8, д.

2. Барботажное массообменное устройство неработоспособно при высоком содержании питательной воды. Кроме того, в барабане диаметром 900 мм сильно затрудняется работа поднятых барботажных массообменных устройств.

3. Ожидаемое содержание котловой воды составляет 10 000 мг/кг, следовательно, согласно графику на рис. 7-3 для обеспечения нагрузки котла 100% требуется установка внутрибарабанных циклонов.

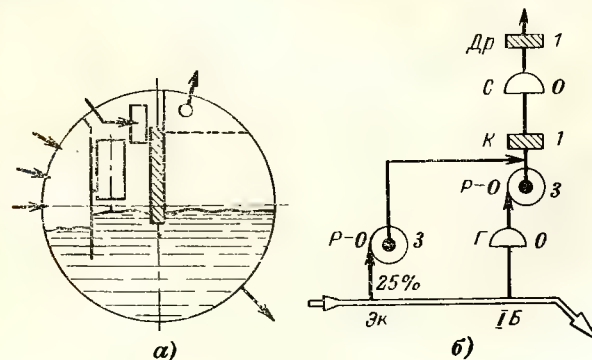


Рис. 11-16. Конструктивная (а) и структурная (б) схемы сепарационных устройств котла СУ-9/39 после модернизации.

0, 1, 3 — различные типы сепараторов; Р-О — радиально-осевой циклон; К — комбинированные жалюзи; С — смешанное движение пара в объеме.

Из-за малой высоты циркуляционных контуров входные циклоны устанавливать нельзя и требуется применение промежуточных либо выходных циклонов.

Так как в котлах с малой высотой циркуляционных контуров нельзя устанавливать эффективно работающие входные внутрибарабанные циклоны из-за их большого сопротивления, то необходимо уменьшение гидравлического сопротивления циклонов при сохранении высокой эффективности работы сепарационных устройств на основе использования структурной схемы, показанной на рис. 11-16.

Теоретические предпосылки для уменьшения гидравлического сопротивления циклонов заключались в следующем.

Сопротивление радиально-осевых циклонов обусловлено в основном сопротивлением на входе пароводяной смеси в циклон

$$\Delta p_{вв} = \rho_{см} \Sigma \xi \frac{w_{вв}^2}{2},$$

где $\Delta p_{вв}$ — сопротивление вводов пароводяной смеси в циклон, н/м²;

12*

ρ — плотность пароводяной смеси, кг/м^3 ;
 $\Sigma\xi$ — суммарный коэффициент сопротивления ввода;
 $\omega_{\text{вв}}$ — скорость ввода пароводяной смеси в циклон, м/сек ;
 Для уменьшения сопротивления ввода были уменьшены все три сомножителя правой части уравнения.

Плотность пароводяной смеси перед поступлением ее в циклон была уменьшена организацией грубой сепарации в предвключенном коробе, открытом снизу. В таком разомкнутом коробе основная масса циркулирующей воды отделяется от пара и уходит в водяной объем, а влажный пар поступает во входное устройство циклонов.

Для уменьшения коэффициента гидравлического сопротивления вводных устройств обычно применяемые улитки в комплекте с глухими подводящими коробами сложных конфигураций с $\Sigma\xi=3\div4$ заменены короткими прямыми соплами со скругленными входными кромками (рис. 6-10,2), у которых расчетный коэффициент сопротивления $\Sigma\xi=1,2\div1,5$.

Для уменьшения скорости ввода без снижения центробежного ускорения диаметр циклонов был уменьшен с 300 до 200 мм. Это позволило принять скорость пара равной 4 м/сек. Ширина ввода составляла всего 10 мм, что также должно было способствовать улучшению сепарации в циклонах.

В табл. 11-1 приведены ориентировочные расчетные значения сопротивления ввода для двух типов циклонов: обычно применяемых, без предварительного грубого сепаратора, и вновь разработанных, с предвключенным разомкнутым коробом. Из таблицы видно, что сопротивление ввода новых циклонов в десятки раз меньше сопротивления обычно применяемых циклонов.

Таблица 11-1

Сопротивление ввода циклонов, кгс/м^2

Тип циклонов	Характеристика циклонов	Центробежное ускорение, м/сек^2			
		50	250	1000	2000
Обычно применяемые	$\rho_{\text{см}} = 300 \text{ кг/м}^3$ $\Sigma\xi = 2,5$ $d = 300 \times 3 \text{ мм}$	280	1 400	5 700	10 000
Новые	$\rho_{\text{см}} = 30 \text{ кг/м}^3$ $\Sigma\xi = 1,25$ $d = 200 \times 3 \text{ мм}$	10	50	200	400

В обычно применяемых циклонах расчетное сопротивление дырчатых потолков принимается в пределах 20—25 для внутрибарабанных и 50—100 кгс/м^2 для выносных. В данном случае выходное устройство выполнено в виде центрального отверстия большого диаметра, расчетная скорость в котором составляет 1 м/сек, что обуславливает сопротивление 0,5—1 кгс/м^2 , им также можно пренебречь.

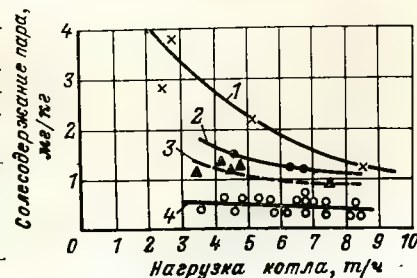
Промышленное опробование новых сепарационных устройств было впервые проведено в августе 1962 г. на котле СУ-9/39 производительностью 9 т/ч, давлением в барабане 42 кгс/см^2 и температурой перегретого пара 450°С [Л. 43].

В данном случае имело место редко встречающееся совпадение высокого солевого содержания питательной воды, достигавшего 1 000 мг/л, малого движущего напора, так как высота фронтального экрана была меньше 2 м, и малого диаметра барабана, равного 900 мм.

Заводские сепарационные устройства были рассчитаны на питание котла конденсатом с солевым содержанием не выше 50—60 мг/л, поэтому при имеющихся водных условиях производительность котла приходилось ограничивать до 50% расчетной. Продувка котла составляла 50—60% производительности котла. Вследствие заноса солями происходил частый перегрев змеевиков пароперегревателя. К моменту переделок половина трубок второй ступени пароперегре-

Рис. 11-17. Зависимость солевого содержания пара от производительности котла СУ-9/39 после модернизации.

1 — давление 35 кгс/см^2 ; 2 — давление 37 кгс/см^2 ; 3 — давление 39 кгс/см^2 ; 4 — через три года эксплуатации.



вателя оказалась полностью забитой, а в остальных наблюдались значительные отложения легко растворимых солей. Наблюдались также циркуляционные аварии.

Компоновка новых сепарационных устройств выполнена компактной. Конструкция циклонов получилась несложной — боковая стенка и крышка с центральным отверстием. Вводные сопла выполнены как одно целое с разомкнутым коробом.

Питательная вода подается в восемь автономных циклонов диаметром 140 мм, которые также не сложны по устройству и представляют собой отрезки труб без дна и крышек. Их потребовалось устанавливать из-за высокого плотного остатка питательной воды, а также для защиты стенок барабана от ее воздействия.

Пар из кипяточных труб поступает под погруженный наклонный лист, снабженный гидрозатвором, а затем — в разомкнутый короб, в котором отделяется основная масса воды, а влажный пар входными соплами направляется в батарею циклонов. Пар из циклонов проходит жалюзи, шаровое пространство барабана и через пароприемный потолок поступает в паросборную трубу.

При проведении 11 серии теплотехнических испытаний установлено, что новые сепарационные устройства работают более эффективно, чем заводские.

Разница уровней воды в разомкнутом коробе и остальном объеме барабана не превышала 20 мм, что подтверждает данные расчета гидравлического сопротивления вводных устройств циклонов (скорость ввода пароводяной смеси 4 м/сек, $\alpha=166 \text{ м/сек}^2$).

На рис. 11-17 показан график зависимости солевого содержания пара от нагрузки котла (солевого содержания пара определялось по лабораторному солемеру с предварительными обогащением и дегазацией

проб). На этом графике имеются данные трех групп опытов, различавшихся по давлению пара.

С увеличением паропроизводительности котла от 2 до 9 т/ч соледержание пара не увеличивается, как обычно, а уменьшается.

Принимая во внимание отсутствие зависимости качества пара от щелочности как питательной, так и котловой воды, следует предположить, что имело место отмывание напесенных ранее отложений из паросборной трубы.

С ростом производительности котла концентрация отмываемых солей в паре уменьшается вследствие большего разбавления, чем и объясняется характер графика на рис. 11-17. Толщина отложений на стенках паросборной трубы перед пуском котла составляла 2—5 мм, следовательно, этот слой вымывался длительное время.

Резкое ухудшение качества пара (бросок) с 0,6 до 4 мг/кг наступило при плотном остатке котловой воды 12 000 мг/кг, производительности 9 т/ч и быстром понижении давления с 37 до 30 кгс/см². При давлении 39 кгс/см² плотный остаток котловой воды был введен до 15 000 мг/кг.

После завершения испытаний головного котла аналогичными устройствами был оборудован и успешно пущен еще один котел СУ-9/39.

Через 3 года после пуска были проведены наблюдения за работой этого котла с применением прежней методики определения соледержания пара и воды. Установлено, что соледержание пара уменьшилось и составляет 0,5 мг/кг и в пределах нагрузки 9 т/ч не ухудшается. Отмечено повышение соледержания пара до 0,8 мг/кг при подъеме уровня воды в барабане. Ранее, при пусковых испытаниях котла этой зависимости не отмечалось из-за искажающего влияния вымываемой составляющей.

В литературе неоднократно отмечалось вымывание солей насыщенным и перегретым паром. По-видимому, в данном случае ухудшенное качество пара при пуске обуславливалось вымыванием солей из паросборной трубы.

В результате проведенных переделок производительность котла была повышена до расчетной, а продувка котла уменьшена вдвое. Следует отметить также, что колебание уровня воды в барабане ранее было ограничено пределами 0+25 мм, а после наладки такие жесткие ограничения были сняты и колебание уровня в эксплуатации составляло ±50 мм. Циркуляционные аварии, имевшие ранее место при схеме ступенчатого испарения и объяснявшиеся высоким соледержанием котловой воды солевого отсека, после переделок сепарационных устройств прекратились. Влияние соледержания воды на циркуляцию незначительно [Л. 52], хотя при определении истинного паросодержания в кипяtilльной трубе работающего котла установлено, что оно зависит от соледержания котловой воды. На паросодержание контура более существенное влияние оказывает его гидродинамика.

Организованный поиск оптимальных решений привел к существенному улучшению работы котла при весьма тяжелых условиях воднохимического режима. Правильный выбор принципиальных решений с последующей конструктивной проработкой узлов обеспечил коренное улучшение работы сепарационных устройств котла.

Котлы ШБ-А5. Котел типа ШБ-А5 производительностью 5,5 т/ч и поверхностью нагрева 175 м² для повышения его производитель-

ности до 8,5 т/ч был модернизирован. Увеличена высота топки на 1 500 мм, экранированы боковые и задняя стенки топки [Л. 40].

В барабане котла ранее были установлены погруженный дырчатый лист и пароприемный потолок (рис. 11-18,а). Влажность пара при нагрузке 7 т/ч составляла 70% (рис. 11-18,в). В барабане прослушивались гидравлические удары.

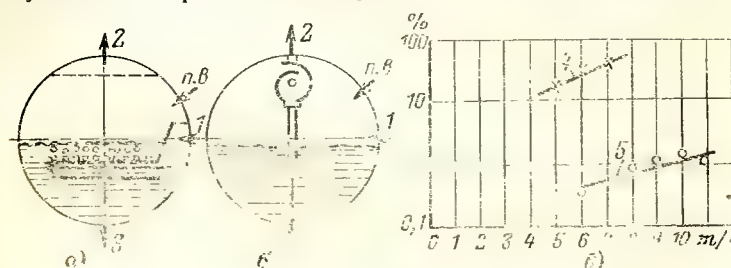


Рис. 11-18. Сепарационные устройства котла ШБ-А5.

а — до модернизации; б — после модернизации; в — зависимость влажности пара от производительности котла до (4) и после (5) модернизации; 1 — ввод пароводяной смеси; 2 — отбор пара; 3 — отвод воды; п. в. — ввод питательной воды.

Согласно методике проверено соответствие установленных сепарационных устройств условиям воднохимического режима и другим эксплуатационным условиям. Оптимальное соледержание котловой воды при питательной воде 250 мг/кг должно составлять 3 000—4 000 мг/кг. Относительная паровая нагрузка составляет 160% номинальной. По графику рис. 7-3 находим, что при этих условиях погруженные массообменные устройства не могут давать пара нормального качества. Требуется установка внутрибарабанных циклонов (на пределе). Лучше — выносные, со схемой ступенчатого испарения.

Принято решение установить внутрибарабанные циклоны. Условия циркуляции на котле ШБ-А5 — наклонные кипяtilльные трубы при высоте контура менее 2 м. По графику (рис. 6-9) определяем максимально допустимое сопротивление сепарационных устройств для контура циркуляции. Находим, что величина этого сопротивления не должна превышать 400 кгс/м². Входные циклоны не подходят из-за повышенного сопротивления (более 1 000 кгс/м²). Промежуточные могут быть применены, но учитывая малый диаметр барабана (900 мм) и топливо (мазут) — решено установить в барабане котла выходные циклоны.

Новые сепарационные устройства (рис. 11-18,б) состояли из двух горизонтальных циклонов диаметром 250 мм, длиной по 1 000 мм каждый. Циклоны установили в верхней части барабана и включили на выходе пара из него. Скорость входа пара в циклоны составляла 10—12 м/сек. Центробежные ускорения, развиваемые в циклонах, составляли 100—150 g, что и обеспечило высокую эффективность работы новых сепараторов. Отсепарированная влага сливалась в опускные трубы, а осушенный пар направлялся в паропровод.

Вторая серия теплотехнических испытаний, проведенная после установки новых сепарационных устройств, показала, что котел

может нормально работать со щелочностью котловой воды 30 мг-экв/кг (солеосодержание 4000 мг/кг). Как видно из графика (рис. 11-18, в), при нагрузке 9 т/ч влажность пара составляла 1%. Если сравнить эти данные с влажностью пара до модернизации, то видно, что замена объемных сепарационных устройств центробежными уменьшила влажность пара в десятки раз.

Сравнение работы этого котла при установке объемных и центробежных сепараторов приведено в табл. 11-2.

Таблица 11-2

Характеристика	Объемные сепараторы	Центробежные сепараторы
Производительность котла, т/ч	5—6	10—11
Влажность пара, %	30—40	1
Щелочность котловой воды, мг-экв/кг	5—6	20—25
Продувка котла, %	40	10—15

Котлы Шухова. На пятибарабанном котле Шухова для повышения производительности с 6—8 до 12 т/ч были установлены боковые экраны. Сепарационные устройства (рис. 11-19, а) оставлены без изменения. На котлах с диаметром барабанов 630 мм разбежка

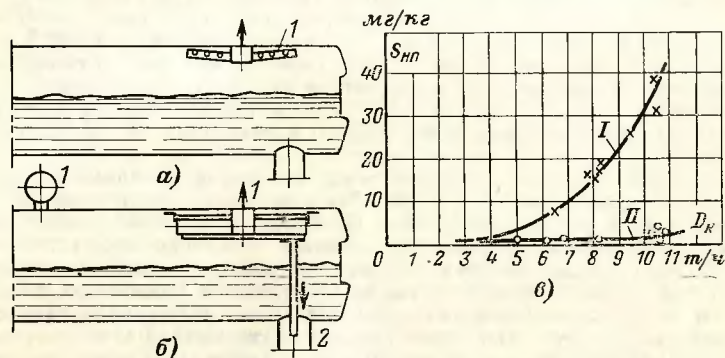


Рис. 11-19. Сепарационные устройства котла Шухова.

а — до модернизации; б — после модернизации; в — зависимость влажности пара до (I) и после (II) модернизации; 1 — отбор пара; 2 — отвод воды.

уровней достигала 150 мм, что уменьшало паровой объем отдельных барабанов. Для уменьшения разбежки уровней воды по барабанам паровые объемы их были соединены через штуцера предохранительных клапанов коллектором $\varnothing 219 \times 7$ мм. Это мероприятие снизило влажность пара с 40 до 10%.

После стабилизации уровней воды в барабанах был проведен выбор требуемых сепарационных устройств.

По графику (рис. 7-3) при относительной нагрузке 150% нормальной и солеосодержании котловой воды 3000—4000 мг/кг требуется установить внутрибарабанные либо выносные циклоны. По условиям циркуляции — наклонные трубы, малая высота — приняты внутрибарабанные выходные циклоны (рис. 11-19). Вместо паросборных труб на отборах пара из барабанов установлено по 4 циклона диаметром 150 и длиной 330 мм каждый. Всего 20 циклонов на котел (рис. 11-19, б). Отсепарированная влага введена в опускные трубы с целью улучшения условий ее отвода.

После установки циклонов солеосодержание пара снизилось до 3 мг/кг (рис. 11-19, в). Солеосодержание питательной воды составляло 300 мг/кг, а котловой воды 3000—4000 мг/кг. И в этом случае подтвердилось на практике целесообразность проведенных переделок.

Котлы ШБ-А7. На экранированном котле ШБ-А7, оборудованном схемой ступенчатого испарения с выносными циклонами, производительность была повышена с 8 до 15 т/ч. Вновь установленные экраны выдавали пар в выносные циклоны. Нагрузка барабана осталась без изменения. На выходе пара из барабана оставлено заводское сепарационное устройство — выходной горизонтальный циклон. Сопротивление его составляло 3000 кгс/м². В паропроводящих трубах от выносных циклонов до паросборника были установлены дроссельные шайбы для уравнивания сопротивлений.

Уровень воды в циклонах составлял 700 мм от оси барабана, высота падения струй воды на уровень — 1100 мм.

В качестве наладочного мероприятия уровень воды в циклонах был поднят до оси барабана и стабилизирован. Высота падения воды уменьшилась до 400 мм. Влажность пара уменьшилась с 70 до 0,1%. Прекратился пережог кипяtilных труб. По этой схеме налажено 24 выносных циклона на 6 котлах.

Из этого примера видно, что значительное понижение уровня воды в циклонах нежелательно как в отношении циркуляции, так и в отношении сепарации.

В [Л. 36] имеются указания на то, что ухудшение условий циркуляции, в частности уменьшение скорости воды в трубах, вызывает интенсификацию отложения накипи на внутренних поверхностях обогреваемых труб.

Для нормальной работы циклонов требуется поддерживать оптимальный уровень воды в них. Очевидно, что повышение уровня воды над местом ввода пароводяной смеси уменьшает паровой объем и ухудшает условия сепарации; однако вывод о том, что большие понижения уровня также способствуют ухудшению качества пара, кажется несколько неожиданным. Вместе с тем, как это показало моделирование и подтверждено теплотехническими испытаниями, при понижении уровня создаются благоприятные условия для вспенивания.

В наладочной практике встречались случаи, когда расстояние от уровня воды в циклонах до пароприемного потолка составляло 3 м. При скорости ввода пароводяной смеси 2—4 м/сек влажность пара из циклонов со-

ставляла 50—70%, что можно объяснить лишь образованием вторичной пены в циклонах.

Из всего сказанного следует, что работа циклонов на котловой воде высокого солевого содержания требует создания оптимальных условий разрушения высокоустойчивой пены.

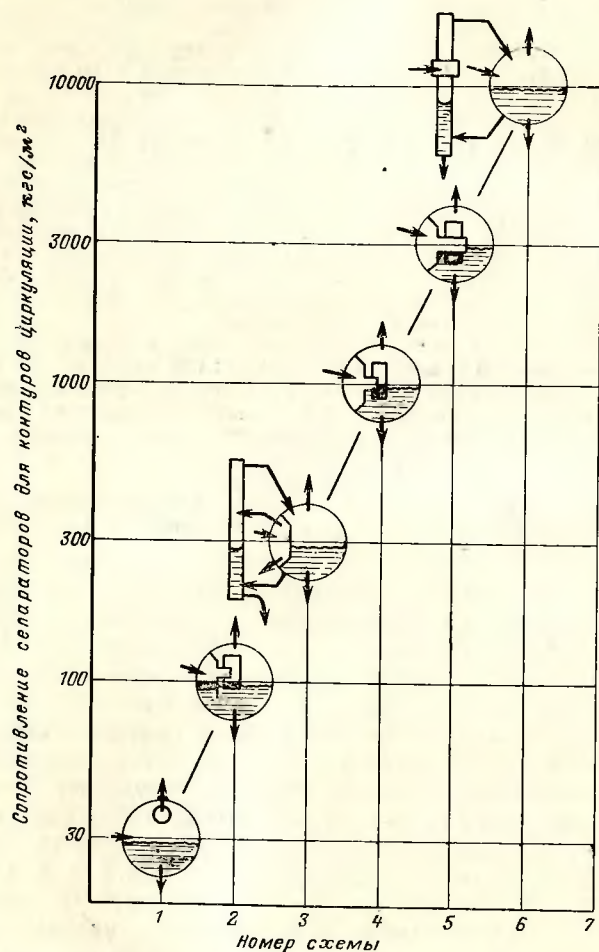


Рис. 11-20. Зависимость сопротивления циклонов для контуров циркуляции от схемы включения.

1 — выходные; 2 — промежуточные внутрибарабанные; 3 — промежуточные выносные; 4 — входные внутрибарабанные без улиток; 5 — входные внутрибарабанные с улитками; 6 — входные выносные с развитыми улитками.

Требуемый тип сепарационного устройства выбирался из условий работы барабана при котловой воде с солевым содержанием 700 мг/кг и относительной нагрузкой 100%. Согласно графику рис. 7-3 достаточно эффективным должен быть жалюзийный сепаратор. После проведения переделок во время второй серии испытаний было установлено, что котел дает пар с влажностью в пределах 1%. При малом сопротивлении пароперепуска представилось возможным надежно стабилизировать уровни воды в циклонах, что прекратило циркуляционные аварии и повысило эффективность работы циклов [Л. 53]. В данном случае на основе использования предложенной методики выбора сепарационных устройств оказалось возможным отказаться от установки более эффективных сепараторов в барабане котла для стабилизации уровней воды в выносных циклонах.

В заключение следует отметить, что при выборе схем включения циклонов и их конструктивного исполнения можно руководствоваться диаграммой, изображенной на рис. 11-20, на которой циклоны размещены в порядке увеличения их гидравлического сопротивления для контуров циркуляции. Наименьшее влияние на условия циркуляции оказывают циклоны, питаемые избыточным давлением пара в барабане. Для котлов с малыми движущими напорами циркуляционных контуров применимы в основном три нижние схемы включения, поскольку они имеют гидравлическое сопротивление в пределах 300 кгс/м². Остальные схемы можно применять лишь для больших котлов среднего давления, обладающих большим движущим напором циркуляционных контуров. Однако в ряде случаев и для больших котлов уменьшение гидравлического сопротивления сепарационных устройств оказывается весьма полезным мероприятием.

На рис. 11-20 указан порядок величин сопротивления различных схем включения, по которым представляется возможность выбрать требуемый вариант. Как видно из этого рисунка у трех нижних схем (№ 1, 2, 3) имеется одно общее свойство — пароводяная смесь перед поступлением в циклоны подвергается предварительной грубой сепарации. Все эти схемы согласно предложенной классификации принадлежат к группе «0» (см. гл. 8), чем и объясняется их малое сопротивление.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полянский М. Я., Блинов К. А., Предотвращение образования отложений на внутренних поверхностях паровых котлов низкого давления, БТИ ОРГРЭС, 1968.
2. Рассудов Н. С., Некоторые данные о выполнении оборудования для котельных, отчет ЦКТИ, Ленинград, 1962.
3. Роддатис К. Ф., Требования к конструкции котлов малой мощности, ВНИИТОЭ, 1957.
4. Шкроб М. С., Прохоров Ф. Г., Водоподготовка и водный режим паротурбинных электростанций, Госэнергоиздат, 1961.
5. Рябцев Н. И., Влияние температуры питательной воды на работу котельных агрегатов, «Промэнергоиздат», 1963, № 7.
6. Стырикович М. А., Маргулова Т. Х., Письмо в редакцию, «Электрические станции», 1966, № 11.
7. Госгортехнадзор, Аварии на объектах котлонадзора и меры по их устранению, Госгортехиздат, 1962.
8. La Mont, Mehrstufige Sleudervorrichtung der Flüssigkeit aus Gemisch, Pat, № 698319, 29/II 1936.
9. Ноев В. Н., Опыт осуществления трехступенчатого испарения в паровых котлах, ОРГРЭС, 1950.
10. Ноев В. Н., Панасенко М. Д., Эффективность внутрикотловых сепарационных устройств, «Пар высокого давления в энергетике», 1958.
11. Ноев В. Н., Ялышев З. С., Водный режим и внутрикотловые устройства ТЭЦ высокого давления, ОРГРЭС, 1964.
12. Бузников В. М., Судовые котлы, Судпромгиз, 1954.
13. Лысков М. Г., Повышение эффективности работы промышленных котельных, ЦБТИ, МГСНХ, № 37577, 1961.
14. Сухарев Е. И., Акопянц Б. Е., Перевод серийных котлов СУ-9/39 на питание водой высокого солевого содержания, ГОСИНТИ, № 25-63-195/3, 1963.
15. Бузников Е. Ф., Внутрикотловые устройства и их расчет для котлов малой и средней мощности, ВЗЭИ, 1960.
16. Щукин А. А., Газовое и печное хозяйство заводов, изд-во «Энергия», 1966.
17. Козлов Ю. В., Развитие конструкций сепарационных устройств парогенераторов и кипящих реакторов АЭС с водяными реакторами, «Теплоэнергетика», 1960, № 1.
18. Трасу Н. Н., Wasserabscheider, патент № 351465 от 27/II 1920.
19. Курилин Б. С., Основные направления развития паровых котлов и вспомогательного оборудования в США, БТИ ОРГРЭС, 1963.

20. Дыхно Н. О., Савченко В. В., Эксплуатация котлоагрегата среднего давления при непосредственном питании его умягченной морской водой, «Энергетик», 1969, № 4.
21. Сухарев Е. И., Нормы качества пара и воды для котлов малой мощности, «Промышленная энергетика», 1964, № 12.
22. Белан Ф. И., Сутоцкий Г. П., Водоподготовка промышленных котельных, изд-во «Энергия», 1969.
23. Steinmüller L. G., Wasserrohrkessel mit mehreren Oberkessel, патент № 285489 от 15/XII 1912.
24. Сборник директивных материалов ТУ МЭС, Госэнергоиздат, 1951.
25. Дементьев Б. А., Лепилин Р. С., Исследование предотвращения захвата паровых пузырей в опускные участки, изд. МЭИ, 1955.
26. Бузников Е. Ф., Циклонные сепараторы в паровых котлах, изд-во «Энергия», 1969.
27. Валуев А. В., Мышкин К. П. и др., Внутрибарабанные сепарационные устройства для котлов ШБ и Шухова, «Промышленная энергетика», 1963, № 8.
28. Маргулова Т. Х., Водный режим тепловых электрических станций, изд-во «Энергия», 1965.
29. Корнев М. С., Теоретические основы процесса очистки воздуха от пыли, Машгиз, НАМИ, 1954, № 72.
30. Стырикович М. А. и др., Парогенераторы электростанций, изд-во «Энергия», 1966.
31. Мышкин К. П., Батарея малогабаритных циклонов для котлов ГМ-50-1, ГОСИНТИ, 1969, № 68.
32. Балдина О. М., Образование вихревых воронок над опускными трубами, «Теплоэнергетика», 1955, № 10.
33. Мышкин К. П., Усовершенствование схемы непрерывной продувки котлов ШБ-А7, ГОСИНТИ, 1968.
34. Макинский И. З., Питание котлоагрегатов высокого и среднего давления высокоминерализованной водой, «Энергомашинное строительство», 1966, № 4.
35. Ялышев З. С., Гидродинамика выносных циклонов, ОРГРЭС, 1959, № 17.
36. Засядько И. Н., О влиянии скорости циркуляции на отложение накипи, Известия вузов, 1962, № 12.
37. Оганов Ц. И., Любин Б. Ш., Модернизация котлов ШБ, работающих на жидком и газообразном топливе, «Промышленная энергетика», 1962, № 8.
38. Бузников Е. Ф. и др., Опыт модернизации котла ДКВР 6, 5, 13 с повышением производительности до 20 т/ч, «Промышленная энергетика», 1968, № 6.
39. Мышкин К. П., Малогабаритные сепарационные устройства для котлов ДКВР-10/13, ГОСИНТИ, 1966.
40. Котенев Е. Д., Мышкин К. П., Реконструкция сепарационных устройств котла ШБ-А5, ГОСИНТИ, 1965.
41. Мышкин К. П., Центробежные сепараторы для котла Шухова, БТЭИ, 1966.
42. Котенев Е. Д., Мышкин К. П., Модернизация сепарационных устройств на котле ШБ-А7, ГОСИНТИ, 1966.
43. Мышкин К. П., Внутрибарабанные циклоны малого сопротивления для паровых котлов, ГОСИНТИ, 10-64-184, 1964.
44. Бузников Е. Ф., Опыт работы безбарабанных котлов

с естественной циркуляцией, Энергоснабжение городов, Коммунальное хозяйство городов РСФСР, 1962.

45. Семеновкер И. Е., Промывка пара над внутрибарабанными циклонами, авторское свидетельство № 102520 от 9/VI 1955.

46. Роддатис К. Ф., Нарушения циркуляции и повреждения обогреваемых труб при неправильном осуществлении сепарационных устройств, Известия ВТИ, 1951, № 10.

47. Основные методические положения и исходные данные для проведения технико-экономических расчетов в теплоэнергетике, ОНТИ, ВТИ, 1968.

48. Ястремский Б. С., Избранные труды, изд-во «Статистика», 1964.

49. Шапкин И. Ф., Пути упорядочения водного режима котлов промышленных котельных, Иркутск, 1961.

50. Мынкин К. П., Лабиринтный вентиль для продувочных узлов, ГОСИНТИ, 1964.

51. Мынкин К. П., Модернизация, ремонт и эксплуатация сепарационных устройств промышленных паровых котлов, ГОСИНТИ, 1968.

52. Maillé G., Moignard J., Измерение удельного веса пароводяной эмульсии в экранной трубе котла с помощью радиоактивных элементов, Rev. gen. therm., № 10, 1962.

53. Мынкин К. П., Наладка работы выносных циклонов на промышленных котлах типа ШБ-А7, ГОСИНТИ, 1965.